

**METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN Y  
APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS PROVENIENTE DE RESIDUOS SÓLIDOS  
URBANOS**

**TRABAJO DE GRADO**

**ABEL SANTIAGO AGUDELO CASTAÑEDA  
ANDRÉS FELIPE CARMONA CARMONA**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
2020**

**METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN Y  
APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS PROVENIENTE DE RESIDUOS SÓLIDOS  
URBANOS**

**TRABAJO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO**

**ABEL SANTIAGO AGUDELO CASTAÑEDA  
ANDRÉS FELIPE CARMONA CARMONA**

**DIRECTOR DEL PROYECTO:  
ÁLVARO RESTREPO Dr. Eng.**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
INGENIERÍA MECÁNICA  
PEREIRA**

**2020**

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
1.2. ANTECEDENTES .....	8
1.3. MOTIVACIÓN.....	9
1.4. OBJETIVOS .....	10
1.5. APORTE FORMATIVO .....	10
1.6. ORDEN DEL DOCUMENTO. ....	11
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS - RSU.....	12
2.2. SISTEMAS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN COLOMBIA .....	13
2.3. GENERACIÓN DE BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS.....	15
2.3.1. FACTORES INFLUYENTES EN LA GENERACIÓN DE BIOGÁS .....	17
2.4. CAPTACIÓN DE BIOGÁS DE RELLENO SANITARIO .....	18
2.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS RSU PROVENIENTES DE UN RELLENO SANITARIO.....	20
2.6. MODELOS DE GENERACIÓN DE BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS	22
2.6.1. MODELOS TEÓRICOS .....	22
2.6.1.1. <i>Landfill gas emission model (LandGem)</i> .....	23
2.6.1.2. <i>Modelo colombiano de biogás</i> .....	26
2.7. APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS PROVENIENTE DE RELLENOS SANITARIOS .....	29
2.7.1. GENERACIÓN ELÉCTRICA Y COGENERACIÓN .....	30

2.7.2.	USO DIRECTO COMO GAS DE MEDIO-Btu .....	31
2.7.3.	CONVERSIÓN A GAS DE ALTO-Btu .....	32
2.8.	TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO .....	32
3.	PROPUESTA METODOLOGICA PARA SISTEMA DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO .....	36
3.1.	PASO 1: CARACTERIZACIÓN DEL RELLENO SANITARIO.....	38
3.2.	PASO 2: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS .....	39
3.3.	PASO 3: TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO Y TRATAMIENTO ...	43
4.	CASO DE ESTUDIO RELLENO SANITARIO LA GLORITA .....	46
4.1.	CARACTERIZACIÓN DEL RELLENO SANITARIO LA GLORITA .....	46
4.2.	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS .....	49
4.3.	TECNOLOGÍAS PARA APROVECHAMIENTO Y TRATAMIENTO.....	52
5.	CONCLUSIONES.....	58
	BIBLIOGRAFIA .....	60

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Jerarquía de gestión de residuos.....	13
Figura 2. Variación de la composición del biogás.....	16
Figura 3. Pozo de extracción vertical .....	19
Figura 4. Zanja de extracción horizontal.....	19
Figura 5. Sistema de captación pasiva de biogás de relleno sanitario.....	20
Figura 6. Metodología para el diseño de extracción y aprovechamiento de biogás.....	38
Figura 7. Diagrama de factores influyentes en los modelos para estimar la producción de biogás.....	40
Figura 8. Diagrama de factores para el cálculo de la eficiencia del sistema de captura.....	41
Figura 9. Diagrama de selección de tecnología de aprovechamiento y tratamiento requerido.....	44
Figura 10. Ubicación geográfica del relleno sanitario La Glorita de Pereira .....	46
Figura 11. Geometría de relleno sanitario tipo trinchera o zanja .....	47
Figura 12. Caracterización de RSU en el relleno sanitario La Glorita .....	48
Figura 13. Estimación de biogás generado en el relleno La Glorita.....	50
Figura 14. Estimación de Biogás y metano captado en el relleno La Glorita. ....	51
Figura 15. Conjunto generador impulsado por turbina de gas. ....	52
Figura 16. Diagrama esquemático ciclo Brayton. ....	54
Figura 17. Simulación del ciclo Brayton en software Cycle Tempo.....	56

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición química promedio del biogás. ....	15
Tabla 2. Valores estimados del parámetro MFC. ....	25
Tabla 3. Valores del índice de generación de metano (k) .....	28
Tabla 4. Valores de la generación potencial de metano ( $L_0$ ).....	28
Tabla 5. Eficiencia promedio de recolección de biogás basada en métodos de operación ..	42
Tabla 6. Condiciones iniciales para la simulación del ciclo Brayton. ....	53
Tabla 7. Descripción de componentes del ciclo Brayton. ....	54
Tabla 8. Resultados de simulación del ciclo de generación de potencia.....	56

## **1. INTRODUCCIÓN**

Los rellenos sanitarios son lugares generalmente apartados de las ciudades que tienen como función servir para la disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) generados en los domicilios, como también aquellos provenientes del comercio e industria que presentan características de composición similares. En el interior se genera la descomposición microbiológica de la materia orgánica que da como resultado la liberación de una mezcla de gases que se conocen como biogás, el cual cuenta con un poder calorífico significativo que permite su aprovechamiento.

El objetivo de este trabajo es presentar una metodología de ingeniería para formular estrategias de captación, tratamiento y aprovechamiento del biogás producido en los rellenos sanitarios, incluyendo aspectos como la caracterización y cuantificación del potencial energético del mismo.

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la actualidad existen múltiples proyectos que promueven el uso de energías no convencionales, buscando de esta forma reducir el uso de energías no renovables y el impacto negativo que traen estas al ambiente. La población mundial continúa en crecimiento aumentando la necesidad de energía y recursos, paralelo a esto, el consumo de materias primas y la cantidad de residuos sólidos, orgánicos e inorgánicos, siendo los primeros aquellos que sufren un proceso de digestión anaerobia. La descomposición de estos residuos genera una serie de gases que son emitidos a la atmósfera generando un alto impacto ambiental y en la calidad de vida de la población.

En Colombia parte de los rellenos sanitarios emiten esta mezcla de gases directamente a la atmósfera contribuyendo como gases de efecto invernadero (GEI). De este compuesto de gases se destacan dos tipos, siendo el que se encuentra en mayor proporción el metano ( $\text{CH}_4$ ) con porcentajes que están en el intervalo del 50 y 60% de concentración y el porcentaje faltante es asignado, en gran proporción, al dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) [1].

La generación de residuos sólidos urbanos (RSU) el año 2018 en Colombia fue de aproximadamente 30973 toneladas por día, las cuales se depositaron en diferentes sistemas

como rellenos sanitarios, celdas de contingencia, botadero a cielo abierto, entre otras; lo cual teniendo en cuenta las cifras tomadas desde el año 2010 muestra un crecimiento de aproximadamente 10% [2].

Como una alternativa a la disposición final de los residuos sólidos urbanos generados se presentan las técnicas de recuperación energética *Waste to Energy (WtE)*, las cuales contribuyen a la mitigación del impacto ambiental de los RSU, recuperación y aprovechamiento de los recursos, prolongación de la vida útil de los rellenos sanitarios, entre otros.

Las dos corrientes principales de las técnicas *WtE* son los tratamientos biológicos y los tratamientos térmicos. Los tratamientos biológicos conocidos como degradación aeróbica y la digestión anaeróbica o biodigestión, son alternativas para recuperar energéticamente los RSU orgánicos de degradación rápida, en forma de composta y biogás [3].

## **1.2. ANTECEDENTES**

Los residuos sólidos en Colombia y la forma en la que se lleva a cabo su disposición final han planteado para el país un desafío en el cual se ha trabajado desde finales del siglo pasado, promoviendo leyes y normas que permitan mejorar la forma en la que se lleva a cabo; reduciendo así el impacto causado por los GEI sobre el medio ambiente y problemas a la salud y seguridad pública debido a la proliferación de malos olores y vectores como moscas y roedores.

Actualmente en el país, los sitios en los cuales se lleva a cabo la disposición final de los residuos sólidos urbanos no cuentan, a excepción de algunos, con procesos de aprovechamiento del biogás que allí se genera para producir subproductos que puedan ser comercializados, en la mayoría de casos este gas es venteadado directamente a la atmósfera y en algunos otros es capturado y quemado en chimeneas, como es el caso de los rellenos sanitarios La Esmeralda-Manizales, La Pradera-Medellín, Antanas-Pasto, Doña Juana-Bogotá, entre otros.

El relleno sanitario Doña Juana de la ciudad de Bogotá es el único proyecto que en la actualidad cuenta con una planta de biogás apta para procesar el gas metano producido por



los residuos, generando energía eléctrica y reduciendo las emisiones de GEI. Sin embargo, de los 22000 m<sup>3</sup> de gas que se podrían aprovechar, solo se están usando alrededor de 7000 m<sup>3</sup> por la deficiencia en infraestructura [4].

### **1.3. MOTIVACIÓN**

Los gases de efecto invernadero emitidos como resultado de acciones humanas tiene como principales componentes el CH<sub>4</sub> y el CO<sub>2</sub> siendo, además, una de sus principales fuentes de emisión los rellenos sanitarios, de esta manera, dichos gases son los principales componentes del biogás emitido por estos sitios. En Colombia son limitados los alicientes que promueven el control adecuado que deben tener este tipo de gases, por tanto, en gran parte de los rellenos sanitarios estas emisiones van directamente a la atmósfera.

Como consecuencia de la carencia de incentivos y de normas que lleven a un correcto aprovechamiento del biogás proveniente de rellenos sanitarios, las plantas de tratamiento son pocas actualmente en Colombia, además, la falta de conocimiento en tecnologías para el tratamiento y potencial energético de estos compuestos. No obstante, el promover este tipo de estrategias tiene un impacto ambiental evidente, de manera que puede regular el uso de los combustibles fósiles y mitigar las emisiones contaminantes.

La suscitación de este trabajo está enfocada en brindar pautas para el diseño y aprovechamiento del biogás generado en rellenos sanitarios, que promuevan la apreciación de alternativas para captación y uso energético de éste, como fuente de oportunidades económicas con valor social y comercial.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Proponer una metodología para el diseño de un sistema de captación y aprovechamiento de biogás de relleno sanitario enfocado en sus alternativas energéticas.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Identificar métodos para la caracterización de los residuos sólidos urbanos provenientes de rellenos sanitarios por su composición y poder calorífico.
- b) Identificar modelos teóricos para estimar el potencial de obtención de biogás.
- c) Evaluar alternativas tecnológicas de captación, aprovechamiento y proponer escenarios de aprovechamiento energético.
- d) Proponer una metodología para el diseño de un sistema de captación y aprovechamiento de biogás en un relleno sanitario con base en su caracterización, potencial de generación y posibles utilidades energéticas.
- e) Realizar el desarrollo de la metodología propuesta a un relleno sanitario.

## **1.5. APOORTE FORMATIVO**

Este trabajo tiene como finalidad brindar un procedimiento para el aprovechamiento energético del biogás emitido por rellenos sanitarios, con base en las técnicas de aprovechamiento actuales.

Es importante investigar el tema debido a que, en el ámbito nacional, aunque se cuenta con información relacionada con el aprovechamiento energético del biogás producido en rellenos sanitarios no se ha llevado a cabo su implementación, siendo estos la principal fuente de acopio de los residuos sólidos urbanos en Colombia. Se pretende brindar una metodología, que permita evaluar y reconocer el potencial energético que se tiene en el gas de los rellenos sanitarios y las diferentes tecnologías de aprovechamiento que allí se podrían instalar. La implementación de estos proyectos contaría con la presencia de profesionales y demás trabajadores de Colombia abriendo así las puertas al conocimiento y experiencia en este tipo de procesos, en adición, presentaría una oportunidad para la obtención de tecnología limpia y sostenible.

A nivel mundial hay una creciente preocupación por el medio ambiente y el cuidado del mismo, el concejo ejecutivo del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) otorga incentivos a los centros de acumulación de residuos sólidos por medio de los Certificados de Reducción de Emisiones del Protocolo de Kyoto (*CER's*) para mitigar las emisiones contaminantes que producen; siendo Colombia un país en desarrollo con motivo de hacerle frente a este apuro y cumplir con las metas que se ha fijado se ofrecen aquí las herramientas para la implementación de estos sistemas.

## **1.6. ORDEN DEL DOCUMENTO.**

En el capítulo 1 se presenta la problemática relacionada con el adecuado manejo de los residuos generados por los habitantes que van a parar a los rellenos sanitarios, presentando la digestión anaerobia como una técnica que contribuya a la mitigación del impacto ambiental que generan los gases producidos en el proceso de degradación. En este capítulo se presentan los objetivos, aporte formativo y orden del documento.

En el capítulo 2 se presenta la revisión bibliográfica de los RSU, su disposición final en Colombia, caracterización de los residuos y conceptos generales relacionados con la generación de biogás, captación, tratamiento y tecnologías de aprovechamiento. En este capítulo se presentan los modelos de generación de biogás implementados en el trabajo de grado.

En el capítulo 3 se presenta la propuesta metodológica para el diseño conceptual del sistema de captura, tratamiento y aprovechamiento de biogás de relleno sanitario, describiendo la información requerida para llevar cabo la estimación de producción y presentar una alternativa tecnológica viable desde el punto de vista técnico para la implementación de un proyecto.

En el capítulo 4 se presenta el relleno sanitario la Glorita como caso de estudio para aplicar la propuesta metodológica, permitiendo proponer un escenario de aplicación usando un conjunto generador impulsado por una turbina de gas.

En el capítulo 5 finalmente se presentan el análisis de resultados y conclusiones.

## **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

En este capítulo se presenta la revisión bibliográfica y estado del arte de los diferentes conceptos que involucran los residuos sólidos urbanos (RSU) desde los sistemas en los que se lleva a cabo su deposición final, hasta las diferentes técnicas de recuperación energética por medio tratamiento biológico y tecnologías para su uso.

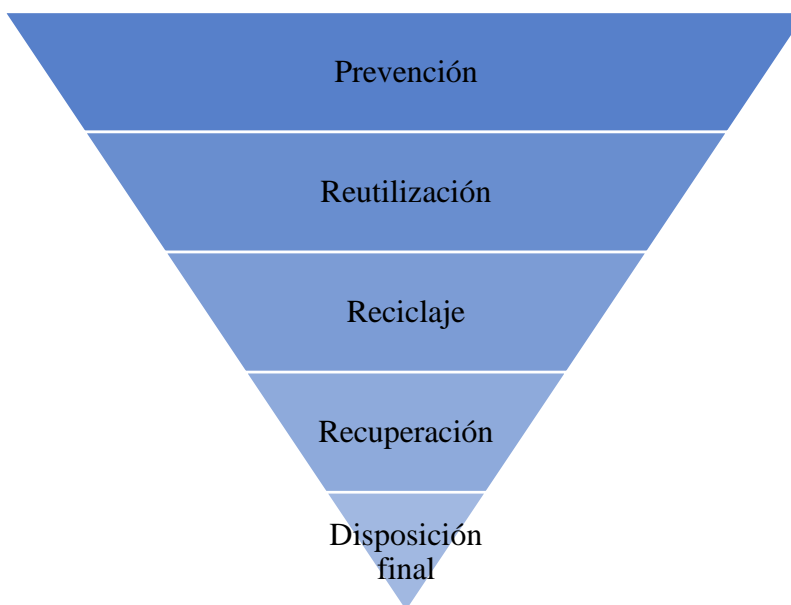
### **2.1. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS - RSU**

Los RSU se refieren principalmente a los materiales desechados por los domicilios, pero también incluye desechos comerciales e industriales que son de similar naturaleza y que son depositados en un relleno sanitario. Los RSU contienen una fracción significativa de papel, desechos alimenticios, madera, recortes de poda, algodón y cuero, además de metales y vidrios, como también derivados del petróleo como plásticos, gomas y telas sintéticas [5]. Los RSU no incluyen residuos industriales peligrosos o de construcción.

La composición física de los RSU está representada por los residuos orgánicos e inorgánicos, estos últimos sufren un proceso de degradación natural, que puede darse tanto en presencia de oxígeno (degradación aerobia) como en ausencia de este (degradación anaerobia), la primera elimina aproximadamente el 80% de la materia orgánica en forma de biomasa y el 20% restante como dióxido de carbono y metano, la segunda transforma la materia orgánica en aproximadamente un 5% biomasa y un 95% en una mezcla gaseosa conocida como biogás o gas de vertedero, compuesta principalmente de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  [6].

En Colombia los residuos sólidos han sido gestionados bajo un modelo lineal, en el cual la materia prima se extrae, se utiliza para fabricar bienes y finalmente se dispone; la reutilización de materiales en el pasado no era una prioridad económica importante, dada la facilidad para obtener nueva materia prima y el bajo costo de la eliminación de los residuos. Sin embargo, actualmente el modelo lineal presenta dificultades asociadas a la escasez de las materias primas que se utilizan en la producción y a la creciente demanda de suelos necesarios para ubicar sitios de disposición final [7]. Es por ello que los diferentes gobiernos e instituciones como la Comisión Europea para el Medio Ambiente han hecho un llamado para avanzar hacia un nuevo modelo de economía circular donde se eliminan los

desechos y los recursos se usan de manera eficiente y sostenible manteniéndolos durante el mayor tiempo posible en el ciclo productivo, con el fin de cumplir lo anterior se buscar aplicar la llamada jerarquía de gestión de residuos que se muestra en la Figura 1.



*Figura 1. Jerarquía de gestión de residuos. Adaptado de [8].*

## **2.2. SISTEMAS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN COLOMBIA**

El constante aumento de la densidad poblacional a nivel mundial y la creciente producción de desechos en las ciudades ha traído consigo la preocupación a los diferentes gobiernos sobre el manejo y eliminación que se le debe dar a los residuos sólidos, es por ello que en países como Colombia se ha reglamentado su recolección, transporte, tratamiento y disposición final. La política para la gestión de los residuos sólidos tiene su fundamento en la constitución política de Colombia, la Ley 99 de 1993 y la ley 144 de 1944, siendo reglamentada en el Decreto 1713 de 2002, Decreto 2820 de 2010 y las Resoluciones del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial 1045 de 2003, 838 de 2005, 1390 de septiembre 27 de 2005, modificada por la resolución 1684 de 2008, y esta a su vez por la 1529 de 2010 [9].

Los sitios de disposición final en Colombia se pueden clasificar como autorizados y no autorizados, teniendo en cuenta si cumplen con la aprobación de la autoridad ambiental competente para operar y cumplen con los lineamientos técnicos para ser reconocidos como una alternativa de disposición final, en este sentido se tiene que los sitios de disposición final adecuados son: rellenos sanitarios, plantas de tratamiento y celda de contingencia y los inadecuados son: celda transitoria, botadero a cielo abierto, enterramiento, vertimientos a cuerpos de agua, quema de residuos sólidos y todo aquel que no cumpla con las definiciones, autorizaciones y requerimientos de la normatividad colombiana (Decreto 838 de 2005, Decreto 2820 de 2010, Resolución 1890 de 2011, Decreto 1077 de 2015, Resolución 330 de 2017, Decreto 1784 de 2017) [2].

Los rellenos sanitarios son la forma de disposición final predominante en Colombia, estos son estructuras construidas en el suelo con el fin de que allí sean depositados sobre capas de tierra los residuos sólidos generados en las diferentes ciudades; estas estructuras con el paso del tiempo se han visto modificadas con el fin de reducir el impacto que en este caso los lixiviados y los gases que allí se generan causan sobre el medio ambiente, además de la proliferación de malos olores, vectores como moscas y roedores y de esta forma cumplir con los reglamentos ambientales actuales y proteger la salud y seguridad pública.

Según el último informe presentado por las autoridades encargadas del control y regulación de residuos sólidos [10], en Colombia:

- Para la vigencia 2018, en el país se dispuso alrededor de 30973 toneladas de residuos por día.
- El 98% ( $30353 \frac{t}{día}$ ) de los residuos reportados se dispusieron en rellenos sanitarios.
- El 90,20% de los municipios (994) del país depositaron los residuos sólidos en sitios autorizados.
- El 10,53% de los municipios (116) del país no cuenta con sitios de disposición final autorizados para los residuos sólidos.

### 2.3. GENERACIÓN DE BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS

El biogás se genera por la descomposición de la materia orgánica (degradación anaerobia), la cual transforma la materia en aproximadamente un 5% biomasa y un 95% en una mezcla gaseosa, en su composición destacan el CH<sub>4</sub> (principal componente del gas natural), el CO<sub>2</sub> y otras pequeñas partes de compuestos orgánicos no metanogénicos (*NMOC*, del inglés, *Nonmethane Organic Compounds*), la composición promedio se muestra en la Tabla 1. Los *NMOC* pueden ser tóxicos y en algunos casos representan peligro para la salud de los habitantes aledaños a un relleno sanitario, siendo estos, clasificados dentro de los compuestos orgánicos volátiles (COV).

Tabla 1. Composición química promedio del biogás. Adaptado de [3].

Parámetro	Unidad	%
Metano	CH <sub>4</sub>	50
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	45
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	5
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S	<1
Compuestos orgánicos no metanogénicos	NMOC	2700 ppmv
Temperatura	°C	10-40
Contenido de humedad	Humedad relativa	0-100
Poder calorífico	MJ/m <sup>3</sup>	10,8-23,3

El proceso de digestión aerobia requiere un aporte neto de energía para llevarse a cabo, contrario a lo que ocurre en un proceso anaerobio que no sólo consume energía, sino que la produce, en la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en CH<sub>4</sub>, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aerobio [11]. El proceso de digestión anaerobia se realiza en cuatro fases en las cuales la materia orgánica se descompone en moléculas sencillas.

Las fases de digestión anaerobia se describe a continuación, y se muestra su desarrollo en la Figura 2 [12]:

- **Fase I:** se produce en condiciones aeróbicas y dura el tiempo requerido para agotar el oxígeno presente, produciendo agua y dióxido de carbono, esta fase limita la velocidad de degradación de los residuos y la generación de metano.
- **Fase II:** utilizando un proceso anaerobio, las bacterias convierten los compuestos creados por bacterias aerobias en ácidos orgánicos, hidrógeno, amoníaco y dióxido de carbono.
- **Fase III:** cierto tipo de bacterias anaerobias consumen los ácidos orgánicos producidos en la segunda etapa, convirtiéndolos en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno, al final de esta etapa disminuyen las concentraciones de hidrógeno y las bacterias productoras de metano comienzan a establecerse.
- **Fase IV:** es la última etapa para la generación de biogás, con los bajos niveles de hidrógeno se promueven los organismos metanogénicos convirtiendo el producto de las fases anteriores en dióxido de carbono y metano.

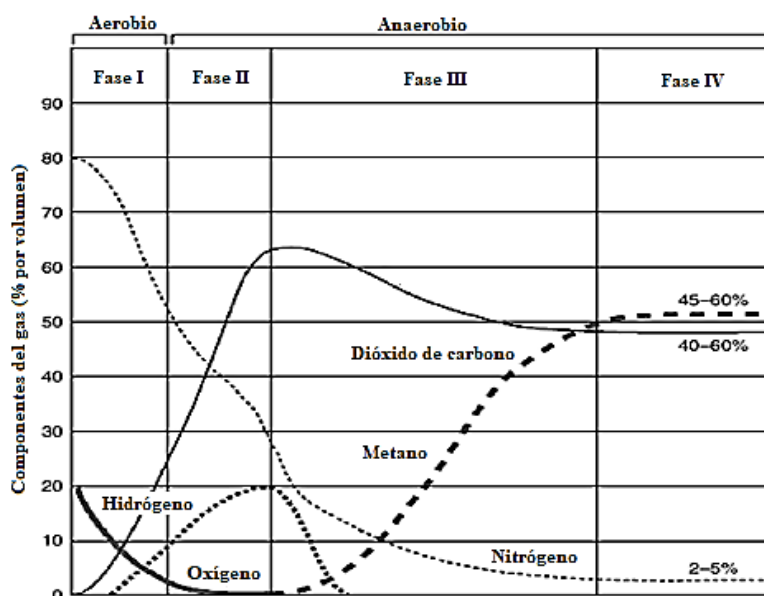


Figura 2. Variación de la composición del biogás. Adaptado de [12]



### 2.3.1. FACTORES INFLUYENTES EN LA GENERACIÓN DE BIOGÁS

En el proceso de generación de biogás que se lleva a cabo durante las diferentes etapas mencionadas de la digestión anaerobia, existen una serie de factores que pueden afectar tanto la cantidad de biogás a producir como la velocidad con la que este proceso se llevará a cabo, dichos condicionantes deben ser tenidos en cuenta en los proyectos de aprovechamiento que se desarrollen. A continuación, se describen algunas de las variables a tener en cuenta:

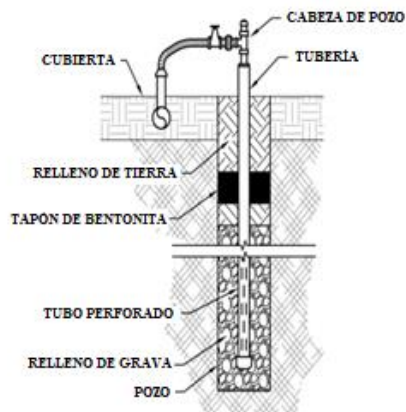
- **Cantidad, antigüedad y composición de los residuos:** la velocidad de producción de biogás y su volumen dependen del tipo, cantidad y ritmo de disposición de materia orgánica, siendo esta de degradación rápida (desechos vegetales y alimenticios) o lenta (papel, cartón, madera, entre otros).
- **Precipitaciones:** permite que la superficie del relleno que ha sido cubierta con tierra sea más impermeable y no permita que los gases escapen, por lo que un caso contrario agrietaría la superficie del relleno abriendo vías de escape para el biogás [13].
- **Temperatura:** el desarrollo de diferentes tipos de bacterias en el proceso de degradación anaerobia de los residuos depende de la temperatura a la que se encuentren estos en el interior del relleno, en cuanto a la temperatura ambiente, afectaría principalmente la parte superficial, siendo clave en aquellos rellenos de baja profundidad.
- **Presión barométrica:** este parámetro puede tener inferencia en el aumento del flujo de biogás y la disminución de la concentración de  $\text{CH}_4$  que este presenta cuando la presión es superior, la posible razón se debe al aumento del flujo de aire en la dirección del relleno [14].
- **Contenido de humedad y pH:** son fundamentales en el proceso de degradación permitiendo la existencia, acción de las bacterias y tasa de generación, en el caso de la humedad si no se tiene en la cantidad adecuado el proceso de generación de biogás será muy bajo o nulo, la variación de esta en los residuos se puede presentar a demás por la composición y las condiciones climáticas [15].

## **2.4. CAPTACIÓN DE BIOGÁS DE RELLENO SANITARIO**

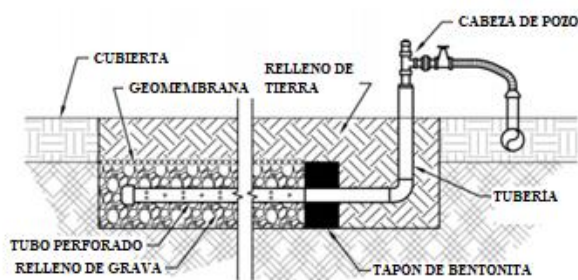
A nivel mundial y especialmente en aquellos países en vía de desarrollo la disposición final de residuos se da en rellenos sanitarios, ya que es un método simple y económico, convirtiéndose estos en fuentes de generación de  $\text{CH}_4$ , que es un gas invernadero y según el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) es 28 a 36 veces más nocivo para la atmósfera que el  $\text{CO}_2$  [16]. Estos son GEI que absorben la energía en forma de radiación, evitando ser liberada al espacio, y en su lugar aumentan la interacción de las moléculas de los gases, elevando su temperatura y posteriormente la de la tierra. La captura del biogás contribuye a reducir el impacto negativo en el ambiente y la salud de las comunidades, además de revalorizar los RSU por medio de una transformación que permite utilizarlos como recurso de energía renovable.

La captación de biogás generalmente comienza después de que una sección de relleno sanitario conocida como “celda” es recubierta para la colocación de residuos adicionales [17]. Los sistemas de captación se pueden clasificar como activos y pasivos, y su selección dependerá de diferentes factores de diseño tales como la cantidad potencial de biogás que se puede extraer del vertedero, condiciones del lugar, entre otros.

En un sistema de recolección activo, el gas se extrae del vertedero mediante la aplicación de succión o vacío a una serie de pozos ubicados en el vertedero. El sistema de extracción más común se basa en tuberías verticales perforadas como se muestra en la Figura 3, que pueden estar conectadas a una tubería de recolección principal o individualmente a estaciones de regulación, generalmente esta configuración es instalada después de la colocación de desechos. Alternativamente, si la recolección de gas se va a iniciar en zonas del relleno aun activas y con mayor profundidad la configuración recomendada son tuberías horizontales perforadas como se muestra en la Figura 4.



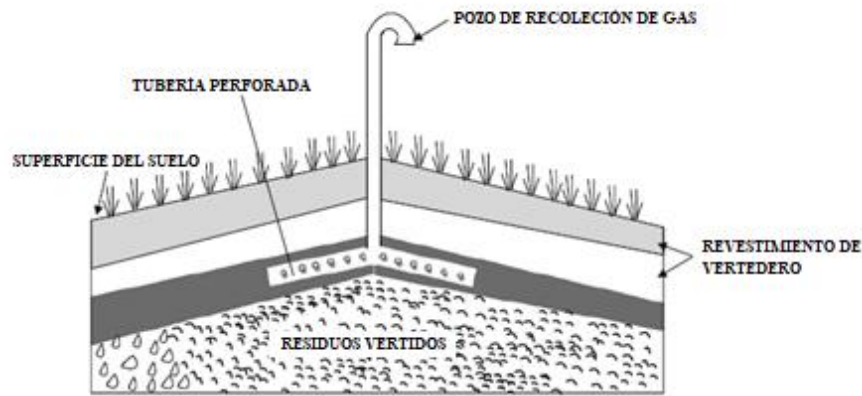
*Figura 3. Pozo de extracción vertical. Adaptado de [17].*



*Figura 4. Zanja de extracción horizontal. Adaptado de [17].*

La eficiencia de recolección de los sistemas mencionados dependerá en gran medida de la permeabilidad de la superficie del vertedero. Una cubierta de baja permeabilidad aumentará la eficiencia de recolección de gas con respecto a una de alta permeabilidad, sin embargo, se reducirá la humedad en el interior del vertedero y con ella la producción de biogás, por lo que es necesario la inyección de agua debajo de la membrana [18].

Los sistemas de captación pasiva extraen el gas del vertedero sin el uso de succión o vacío en las tuberías. Los sistemas pasivos se usan principalmente en rellenos en los que la producción de gas es baja y no se tiene control sobre la regulación de las emisiones a la atmósfera. Estos sistemas controlan la ubicación de las emisiones y previenen la migración hacia áreas adyacentes [18]. La Figura 5 muestra un sistema de captación pasivo.



*Figura 5. Sistema de captación pasiva de biogás de relleno sanitario. Adaptado de [19].*

## **2.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS RSU PROVENIENTES DE UN RELLENO SANITARIO**

En la disposición de los residuos sólidos estos están conformados por mezclas heterogéneas, debido a la variedad de materiales allí mezclados (cartón, vidrio, metales, alimentos, podas, entre otros), el comportamiento de este tipo de residuos al transcurrir el tiempo es de manera diferente en cada época del año e incluso en cada sección del vertedero por el tipo de residuos depositados, simultáneamente, no existe una única composición de residuos, de hecho, estos varían dependiendo del tipo de región y de los desechos de esta, siendo los residuos orgánicos los responsables de la producción de biogás.

Es importante tener medida de la cantidad de materia orgánica, ya que de esto depende la velocidad de degradación, así mismo, es determinante para la obtención de la curva de generación de biogás con respecto al tiempo. Es menester para los rellenos sanitarios y en general cualquier tipo de disposición final de RSU tener estudios claros sobre la caracterización de los mismos, de hecho, son valiosos para realizar proyecciones y planificaciones del modo de recolección, mecanismos de separación y potencial de generación.

En la gran mayoría de casos se cuenta con la información de porcentajes de residuos orgánicos e inorgánicos que ingresan al relleno sanitario, sin embargo, de no tener dicha

información es posible realizar el análisis con los datos de localidades cercanas al relleno. Existen diferentes metodologías de caracterización de los RSU específicas para cada tipo de región y de país donde se evalúan diferentes parámetros, frecuencias y cantidad de muestreos. Los objetivos de realizar esta caracterización son:

- Conocer la composición de los RSU y fuentes de generación para gestión de los mismos.
- Obtener la composición física, distribución por tamaños y cantidad de humedad presente, estos dos parámetros están ligados al origen de generación de los residuos. Esta caracterización es muy relevante para la evaluación de aprovechamiento.
- Realizar un seguimiento de los RSU dentro del sistema de gestión.
- Evaluar estrategias de recuperación y reducción.
- Evaluar los RSU para su aprovechamiento energético.
- Analizar los hábitos de consumo de las comunidades beneficiadas del sitio de disposición.

Existen normativas internacionales que se aplican a la caracterización de los RSU y se basan en la regulación de los procedimientos, operaciones y mediciones de producción y composición, se encuentra entre ellas la ASTM D 5231-92 (*American Society for Testing and Materials*):

La norma ASTM D 5231-92 “Método de Ensayo Estándar para la Determinación de la Composición de Residuos Sólidos Municipales sin Procesar”, establece una serie de procedimientos para la medición de los residuos sólidos mediante una selección y caracterización manual. Se aplica para la determinación de la composición media de los residuos sólidos urbanos, con base a la recolección y clasificación de un determinado número de muestras durante un período de tiempo mínimo de una semana. El método de ensayo incluye los procedimientos para recoger una muestra representativa, la caracterización manual de los diferentes componentes de los residuos, el registro de datos y presentación de resultados.

La caracterización de los residuos sólidos en Colombia es una actividad regida por el decreto 838 de 2005, lo define como “Determinación de las características cualitativas y cuantitativas de los residuos sólidos, identificando sus contenidos y propiedades”, de la

misma manera deja en evidencia los lineamientos para la disposición de estos residuos en los rellenos sanitarios.

En ese sentido, se debe efectuar el seguimiento de las cantidades y de los volúmenes de residuos generados, transportados y dispuestos, lo cual permite llevar la estimación de la vida útil del sistema de disposición final tipo relleno sanitario. La caracterización de los residuos sólidos urbanos se puede determinar en las diferentes etapas de manejo: en la generación, recolección y transporte o en la etapa de disposición final.

## **2.6. MODELOS DE GENERACIÓN DE BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS**

Los métodos para la estimación de generación de biogás se dan en dos grupos, que son:

- Modelos teóricos
- Medición directa en campo

Los modelos teóricos pretenden representar los fenómenos químicos, físicos y biológicos que tienen lugar en el lapso de degradación de los residuos orgánicos. Estos modelos son ampliamente usados por su precisión en los resultados. Actualmente existen modelos de estimación de primer y segundo orden, siendo por facilidad, ampliamente usados los de primer orden.

La medición directa se basa en la toma de datos, sin embargo, solo es válido para aquellas instalaciones que cuentan con un sistema de captación de biogás, cualquiera que sea su finalidad.

### **2.6.1. MODELOS TEÓRICOS**

Entre estos modelos el más reconocido es el modelo del *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), el modelo *Landfill Gas Emission Model* (LandGEM), y el modelo colombiano aprobado por *United States Environmental Protection Agency* LandGEM US-EPA. Algunos modelos como el GasSim utilizan aproximaciones estadísticas y el método de Montecarlo para estimar la producción de metano [3].

La estimación de las emisiones de biogás resulta fundamental en un proyecto de aprovechamiento con el fin de evaluar tanto la viabilidad técnica como económica. Rellenos sanitarios con sistemas activos de extracción proveen información histórica de la captación de biogás y metano, sin embargo, no proporcionan datos estimados del potencial futuro de flujo. La composición de los residuos depositados hace que el proceso de degradación que se desarrolla sea complejo y no se lleve a cabo de manera uniforme en las diferentes áreas de disposición, además teniendo en cuenta la alta variabilidad espacial y temporal lleva a que la estimación de generación de biogás sea un proceso complejo [3].

En los rellenos sanitarios se distinguen dos fases de su vida útil, la primera de ellas es la etapa de funcionamiento durante la cual los RSU son depositados y se tiene la máxima capacidad de producción de biogás, la segunda etapa es la clausura durante la cual se sigue dando la emisión de gases aunque en menor proporción debido a que se tienen residuos de degradación lenta [20].

A continuación, se presentan dos de los modelos de generación de biogás que serán utilizados en la estimación de generación de biogás del relleno sanitario de estudio.

#### ***2.6.1.1. Landfill gas emission model (LandGem)***

El modelo LandGem fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para estimar la cantidad de biogás generado en los rellenos sanitarios con base a los datos aproximados de aceptación de residuos, caracterización preliminar de residuos y constantes de generación de metano [21]. LandGem asume que la generación de metano está en su punto máximo poco después de la colocación inicial de los desechos (después de un breve lapso de tiempo cuando se establecen condiciones anaeróbicas en el vertedero) [22]. El modelo es uno de los que se basa en una ecuación de descomposición cinética de primer orden para la cuantificación de las emisiones derivadas de la descomposición de residuos biodegradables [6]. LandGem utiliza la siguiente ecuación de primer orden para estimar las emisiones anuales durante un período de tiempo específico. La *Ec. 1* utilizada se define a continuación:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left( \frac{M_i}{10} \right) e^{-k t_{ij}} \quad (Ec. 1)$$

donde:

$\sum$ : suma desde el año de apertura +1 ( $i=1$ ) hasta el año de proyección ( $n$ );

$i=1$ : tiempo de incremento de cada año;

$j=0.1$ : tiempo de incremento para cada año;

$Q_{CH_4}$ : generación máxima de metano [ $\frac{m^3}{año}$ ];

$k$ : índice de generación de metano [ $\frac{1}{año}$ ];

$L_0$ : generación potencial de metano [ $\frac{m^3}{Mg}$ ];

$M_i$ : masa de residuos sólidos dispuestos en el año  $i$  [Mg];

$t_{ij}$ : periodo en que los RSU depositados totales  $M_i$ : dispuestos en el año  $i$ , con incrementos  $j$ .

De la tasa de RSU depositados en un relleno sanitario, las emisiones de metano pueden ser estimados suponiendo que  $L_0$  es  $170 \text{ m}^3/\text{Mg}$  y  $k$  es  $0,05 \text{ 1/año}$ . Estos valores son recomendados para países en vía de desarrollo en los cuales la composición de los RSU corresponde con una fracción alta de residuos orgánicos [3].

Se requiere los siguientes parámetros para estimar las emisiones anuales con el modelo LandGem.

- Índice de generación de metano  $k$ : el índice de generación de metano,  $k$ , representa la tasa a la cual los desechos depositados en un relleno sanitario se descomponen y producen  $\text{CH}_4$ . El valor de  $k$  es una función de (1) contenido de humedad residual, (2) disponibilidad de nutrientes para las bacterias generadoras de metano, (3) pH y (4) temperatura [22].
- Generación potencial de metano  $L_0$ : la generación potencial de metano, o  $L_0$ , estima la cantidad de metano potencialmente producida por una tonelada de RSU, cuando son degradados, se debe tener en cuenta que el contenido orgánico seco de los



desechos determina el valor de  $L_0$ , y no el peso húmedo medido y registrado en los depósitos de basuras, ya que el agua no genera biogás. Este parámetro se presenta en la siguiente ecuación. Su valor se estima a partir del contenido de carbono y el factor de conversión estequiométrico tal como lo indica la Ec. 2 [3][22].

$$L_0 = (MFC) \cdot (DOC) \cdot (DOC_F) \cdot (F) \cdot \left(\frac{16}{12}\right) \quad (Ec. 2)$$

donde:

$MFC$ : factor de corrección para el metano;

$DOC$ : fracción de carbono orgánico degradable;

$DOC_F$ : fracción de carbono orgánico degradado asimilado;

$F$ : fracción de metano en el biogás;

$\frac{16}{12}$ : constante estequiométrica.

El factor de corrección para el metano  $MCF$  es un ajuste para estimar la generación de biogás que el modelo toma en cuenta ya que depende del grado de degradación anaeróbica de los RSU. Este valor depende de la profundidad y el tipo de relleno sanitario (controlado, no controlado, a cielo abierto, entre otros) y las prácticas de gestión y manejo asociadas a él. La Tabla 2 expone los valores típicos del parámetro  $MCF$  [3].

*Tabla 2. Valores estimados del parámetro MFC. Tomado de [3].*

Descripción del sitio	Profundidad < 5	Profundidad ≥ 5
No controlado	0,4	0,8
Controlado	0,8	1,0
Semi- aeróbico	0,4	0,5
Condición desconocida	0,4	0,8

Los valores estimados del factor de carbono orgánico degradable  $DOC$  depende de la composición de los RSU, por lo que puede tener variaciones de acuerdo a cada relleno sanitario y región de un país. Este parámetro se estima según la *Ec. 3* [3][21].

$$DOC = 0,40(A) + 0,17(B) + 0,15(C) + 0,30(D) \quad (Ec. 3)$$

donde:

$A$ : porcentaje de los residuos que corresponde al papel, cartón y los textiles

$B$ : porcentaje de los residuos que corresponde a los desechos de jardín y de los parques u otros desechos orgánicos putrescibles (excluidos los alimentos)

$C$ : porcentaje de los residuos que corresponde a alimentos

$D$ : porcentaje de los residuos que corresponde a madera.

El parámetro fracción de carbono orgánico degradable asimilado  $DOC_F$ , se calcula mediante la ecuación *Ec. 4*.

$$DOC_F = 0,014 \cdot T + 0,28 \quad (Ec. 4)$$

donde:

$T$ : temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ].

- Masa de residuos sólidos dispuestos en el año  $M_i$ : Las tasas estimadas de eliminación de desechos son el determinante principal de la generación de biogás en cualquier modelo basado en la descomposición de primer orden. El modelo LandGEM no ajusta las estimaciones anuales de eliminación de residuos para tener en cuenta la composición de residuos [22].

#### **2.6.1.2. Modelo colombiano de biogás**

Este modelo está basado en una ecuación de degradación de primer orden, que puede ser utilizado para estimar la generación y recuperación de biogás en los rellenos sanitarios

colombianos que cuenten con un sistema de recolección o planean implementarlo. Este modelo requiere que el usuario ingrese datos específicos tales como el año de apertura, año de clausura, índice de disposición anual, ubicación del sitio y contestar algunas preguntas referentes a las condiciones físicas pasadas y presentes del sitio. El modelo proporciona automáticamente los valores para el índice de generación de metano  $k$  y la generación potencial de metano  $L_0$ , dichos parámetros fueron desarrollados usando datos específicos del clima, caracterización de residuos y prácticas de disposición de residuos en Colombia. El modelo además utiliza las respuestas del usuario para desarrollar estimaciones sobre la eficiencia de captura para cada año de operación del sistema de captación del biogás. La Ec. 5 presenta el modelo Colombia de biogás [23].

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0,1}^1 2kL_0 \left[ \frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}}) (MCF)(F) \quad (Ec. 5)$$

donde:

$Q_{LFG}$ : flujo de biogás máximo esperado  $\left[ \frac{m^3}{año} \right]$ ;

$i$ : incremento en tiempo de 1 año;

$n$ : (año del cálculo) - (año inicial de disposición de residuos);

$j$ : incremento de tiempo en 0,1 años;

$k$ : índice de generación de metano  $\left[ \frac{1}{año} \right]$ ;

$L_0$ : generación potencial de metano  $\left[ \frac{m^3}{Mg} \right]$ ;

$M_i$ : masa de residuos dispuestos en el año  $i$  [Mg];

$t_{ij}$ : edad de la sección  $j$  de la masa de residuos  $M_i$  dispuestos en el año  $i$ ;

$MCF$ : factor de corrección de metano;

$F$ : factor de ajuste por incendios.

El modelo estima el índice de generación de biogás para cada año usando la ecuación de degradación de primer grado, la cual fue modificada por US EPA en el Modelo LandGem versión 3.02 en el 2005.

El modelo colombiano de biogás aplica ecuaciones separadas para calcular la generación de cada uno de los cuatro grupos de residuos orgánicos agrupados de acuerdo a su índice de degradación: (1) residuos de degradación muy rápida (2) residuos de degradación moderadamente rápida (3) residuos de degradación moderadamente lenta (4) residuos de degradación muy lenta; la generación de biogás total para todos los residuos es calculada como la suma de las cantidades de generación de biogás de cada una de las cuatro categorías de residuos. Cada una de las categorías tiene asignado un valor de  $k$  y  $L_0$  que son usados en el cálculo, dependiendo además del clima de la región en la que se encuentra el sitio. Los valores que usa el modelo para categoría y región se presentan en la Tabla 3.

*Tabla 3. Valores del índice de generación de metano ( $k$ ). Tomado de [23].*

Clima	Precipitaciones [mm/año]	Categoría de residuos			
		1	2	3	4
Excesivamente húmedo	>2000	0,4	0,17	0,07	0,035
Húmedo	1500-1999	0,34	0,15	0,06	0,03
Moderadamente húmedo	1000-1499	0,26	0,12	0,048	0,024
Moderadamente seco	500-999	0,18	0,09	0,036	0,018
Seco	<500	0,1	0,05	0,02	0,01

La generación potencial de metano  $L_0$  usa valores predeterminados para cada departamento o datos de la caracterización de residuos del sitio para calcular los valores en cada una de las cuatro categorías. Los valores de  $L_0$  utilizados en el modelo se muestran en la Tabla 4.

*Tabla 4. Valores de la generación potencial de metano ( $L_0$ ). Tomado de [23].*

Residuos alimenticios	Residuos de jardinería	Papel	Madera y paja	Textiles y pañales desechables
70	93 - 134	186	200	112

**Nota:** Cantidades expresadas en [ $\text{m}^3/\text{Mg}$ ]

El modelo colombiano de biogás utiliza los mismos valores para el factor de corrección de metano *MCF* que el modelo *LandGem*, dichos valores ya fueron presentados en la Tabla 3.

## **2.7. APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS PROVENIENTE DE RELLENOS SANITARIOS**

Siendo los combustibles una de las formas en que se puede medir el crecimiento de un país, correspondiendo el principal a los hidrocarburos, el biogás es una fuente energética para nada despreciable generada de manera natural. Su potencial energético puede ser utilizado, dependiendo de su contenido de  $\text{CH}_4$  y el caudal capturado, en diferentes aplicaciones como son: motores de combustión interna (reciprocantes), turbinas, ciclos de cogeneración, entre otros. Además, corresponde a una práctica de mitigación de GEI. Actualmente existen beneficios correspondientes a regalías por las reducciones certificadas de emisiones (CER's).

En Colombia se cuenta con aproximadamente 65 rellenos sanitarios regionales, en los cuales el aprovechamiento energético de sus emisiones no es notable. Los rellenos sanitarios emiten biogás incluso hasta 30 años desde su fecha de clausura, por lo tanto, existe una fuente amplia para su explotación tanto energética como económica. Dependiendo del uso que se hará del biogás se aplican tratamientos primarios que incluyen la remoción de vapor de agua, condensados, material particulado y espuma o secundarios que remueven sulfuro de hidrógeno, siloxanos, y otros contaminantes como, amoníaco, halógenos y otros componentes aromáticos [24].

Destacan entre los usos del biogás los siguientes tipos de proyectos [25]:

- Proyectos de generación de electricidad y cogeneración.
- Proyectos de uso directo como gas de medio-Btu en calderas, secadores, hornos u otros equipos térmicos.
- Proyectos de conversión de biogás a un gas de alto-Btu asimilable a gas natural para comercializarlo como combustible en gas de tubería, GNC o GNL.

A continuación, se describen las opciones tecnológicas necesarias para llevar a cabo el desarrollo de los anteriores proyectos, teniéndose como principal factor la cantidad de biogás generado y capturado en el vertedero.

### **2.7.1. GENERACIÓN ELÉCTRICA Y COGENERACIÓN**

La generación eléctrica es el uso más común para la utilización del gas de relleno sanitario, a nivel mundial la mayoría de proyectos de aprovechamiento utilizan motores de combustión interna, turbinas de gas o microturbinas, teniendo estos como principal ventaja que solo son necesarios tratamientos primarios para la remoción de partículas y concentraciones de sulfuro de hidrógeno y / o siloxanos en caso de que sean elevadas.

- **Motores de combustión interna**

Son la tecnología de conversión más utilizada, siendo este un motor que funciona en conjunto con un generador eléctrico que produce energía, su costo es relativamente bajo, presentan alta eficiencia y existen en diferentes tamaños que se adecuan al flujo de biogás requerido. Los motores de combustión interna generalmente se han utilizado en rellenos sanitarios donde la cantidad de gas es capaz de producir de 800 kW a 3 MW, o donde las tasas de flujo de biogás sostenibles a los motores son de aproximadamente 300 a 1100 cfm ( $4,47 \text{ E6 m}^3/\text{año}$  a  $16,37 \text{ E6 m}^3/\text{año}$ ) a 50 por ciento de metano [25]. La eficiencia en estos motores puede variar en un rango de 25 a 40 %, aunque se puede alcanzar mayores rendimientos en procesos de cogeneración, cuando se recupera el calor residual que puede ser utilizado en otras aplicaciones. También presentan la ventaja de permitir añadir o quitar motores según las tendencias de recuperación de gas [24].

- **Turbinas de gas**

Las turbinas de gas han sido uno de los dispositivos más utilizados para producir energía eléctrica ya que pueden desarrollar elevadas potencias para una relación de tamaño/peso muy elevada. La turbina de gas es un motor térmico cuya función es obtener un trabajo mecánico a partir de la energía liberada del proceso de combustión. Los principales componentes son: compresor, cámara de combustión y turbina, interconectados entre sí.

Las turbinas de gas son usadas en proyectos de recuperación de gran capacidad en donde el flujo de gas del relleno sanitario sea superior a 1300 cfm ( $19,35 \text{ E6 m}^3/\text{año}$ ) capaces de

generar una cantidad de energía superior a los 3 MW, el costo de producción de energía disminuye con el aumento de capacidad de la turbina, y la eficiencia de generación eléctrica generalmente también mejora. El rango de eficiencia esperado en estos equipos es de 20 a 28 % en plena carga, sin embargo, en instalaciones de cogeneración en donde recupera el calor residual del escape de la turbina para otro proceso se puede alcanzar una eficiencia cercana al 40 % [24].

- **Microturbinas**

Las microturbinas son usuales en rellenos en los cuales la producción y captura de gas es considerablemente baja y el porcentaje de CH<sub>4</sub> presente en la mezcla de gases es inferior al 50 %. Generalmente el costo de producción de kW es superior a equipos como los motores de combustión interna, pero se pueden reducir con el uso de microturbinas de mayor capacidad que además ofrecen mayor eficiencia. El volumen de biogás desde el cual se considera la utilización de microturbinas como una alternativa de aprovechamiento son inferiores a 300 cfm (4,47 E6 m<sup>3</sup>/año). Usualmente las microturbinas vienen en tamaños de 30, 70 y 250 kW y es necesario la remoción de contaminantes del biogás con tratamientos primarios [25].

### **2.7.2. USO DIRECTO COMO GAS DE MEDIO-Btu**

- **Calderas, Secadoras y Hornos**

El uso de biogás en hornos es uno de los más comunes, en este el gas se usa para calentar agua en un sistema de caldera ya sea para calefacción o calor de proceso ejemplo de ello se da en la producción de cemento y asfalto. Este sistema es relativamente simple ya que el gas sólo requiere la eliminación limitada de condesado y tratamiento de filtración previo a su utilización. La desventaja que tiene con respecto a la generación de energía eléctrica es que el precio de la energía térmica es menor, además que la distribución de energía eléctrica es más sencilla debido a la amplia distribución de líneas eléctricas con relación a lugares a donde hay calderas [18]. Las modificaciones o ajustes en los equipos pueden ser necesarios para ajustar los valores de Btu del gas de relleno sanitario o mejorar la calidad a un nivel tal que la caldera no requiera una actualización.

El calor de algunos sistemas de calderas se usa en invernaderos, ya sea por circulación normal de agua caliente o por calentamiento del aire que se insufla en los invernaderos. Esta es una forma relativamente simple y eficiente de usar el gas de medio Btu de manera directa [26], teniendo el gas de medio Btu un potencial energético promedio debido a que la concentración de  $\text{CH}_4$  no ha sido aumentado por algún tratamiento de purificación.

### **2.7.3. CONVERSIÓN A GAS DE ALTO-Btu**

El gas de relleno sanitario puede purificarse hasta un contenido de metano de 98 a 100%, después de lo cual es posible usarlo para producir el equivalente de gas de calidad de tubería (gas natural), Gas Natural Comprimido (GNC) o Gas Natural Licuado (GNL). En consecuencia, puede distribuirse a la red de gas natural para su uso industrial, teniendo como ventaja que ya existe dicho sistema para su transporte. Esto descarta la inversión en una planta de utilización, pero a cambio será necesaria una gran inversión en plantas de purificación. Antes de la inyección a la red de gas natural el biogás debe tratarse para eliminar partículas, líquidos,  $\text{CO}_2$  y algunos componentes trazas como el  $\text{H}_2\text{S}$ , los procesos de tratamiento más comunes incluyen absorción química, adsorción por oscilación de presión y separación de membrana [25], [26].

## **2.8. TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO**

La limpieza del biogás depende de las características propias del sitio de captura y tecnología en la cual se va a utilizar, teniendo en cuenta los requerimientos técnicos de los equipos ya sean para la producción de calor, electricidad o la inyección a la red de gas natural para su posterior aprovechamiento. Diferentes aspectos se deben tener en cuenta sobre la demanda de calidad del biogás que se va a utilizar. Tal vez el aspecto más importante es el relacionado con las especificaciones técnicas de los equipos, no sólo en las tecnologías de aprovechamiento sino también de los equipos de mejora del gas, si lo que se desea es obtener uno con mayor pureza, de esta manera se identificarán sus limitantes y como se puede ajustar el equipo a otras calidades de gas.



El uso de biogás en sistemas de aprovechamiento generalmente requiere tratamientos para la eliminación del exceso de humedad, partículas y otras impurezas. El tipo y rigurosidad del tratamiento depende principalmente de la tecnología de aprovechamiento disponible. En los equipos para la producción de calor y energía como las calderas, los compuestos que pueden causar problemas son sulfuro de hidrógeno, partículas y siloxanos, causando corrosión y obstrucción de algunas piezas (por ejemplo, tuberías), aunque en el caso de calderas de uso industrial en las que los componentes son de mayor escala, las partículas y siloxanos pueden causar menos problemas de obstrucción en componentes [27].

Las turbinas y microturbinas generalmente son flexibles en su funcionamiento y tolerantes a los compuestos traza. En ambas tecnologías el biogás utilizado se comprime, lo que establece demandas de calidad cuando se trata del contenido de humedad. Los fabricantes especifican las concentraciones de compuestos tolerables en los equipos, siendo más riguroso en el caso de las microturbinas [27].

Los motores de combustión interna pueden ajustarse a diferentes composiciones de biogás, pero como en otras aplicaciones, el sulfuro de hidrógeno y los siloxanos pueden ocasionar problemas [27].

En aplicaciones de uso vehicular o inyección a la red de gas natural, el biogás debe tener un alto contenido energético, por lo que es necesario la eliminación del CO<sub>2</sub>. Otras impurezas como el agua y el sulfuro de hidrógeno pueden ocasionar problemas de obstrucción y corrosión en los componentes del vehículo o en las tuberías de transporte de gas. Los diferentes países utilizan estándares para el gas en aplicaciones de transporte o inyección a la red de gas natural [27].

Los sistemas de tratamiento se pueden clasificar como primarios y secundarios. Los sistemas primarios acondicionan el biogás eliminando partículas, humedad y otras impurezas, estos sistemas generalmente incluyen procesos de enfriamiento y/o compresión por medio de los cuales se alteran los parámetros que afectan la solubilidad del agua en el gas. Los sistemas de tratamiento secundario proporcionan una limpieza mayor al gas, eliminando compuestos que los tratamientos primarios son incapaces de eliminar. Los tratamientos secundarios pueden emplear múltiples procesos de limpieza, con tratamientos tanto físicos como químicos. Los sistemas de tratamiento secundario más utilizados son la

adsorción y la absorción. La adsorción es un proceso mediante el cual los contaminantes se adhieren a la superficie adsorbente como el carbón activado o gel sílice. La absorción elimina los compuestos al introducir un solvente o reactivo sólido que produce una reacción física / química [27],[25],[28].

Para realizar la inyección de gas a red de gas natural se requiere un gas con un alto contenido de  $\text{CH}_4$  por lo que es necesario la eliminación de los compuestos que afectan su contenido energético, siendo el más importante el  $\text{CO}_2$ , para ello es necesario la utilización de sistemas de tratamientos avanzados, que pueden garantizar un contenido de  $\text{CH}_4$  superior al 95%. Algunos de los sistemas de tratamientos más utilizados en el mundo se describen a continuación.

- **Lavado con agua**

El lavado con agua es un método de absorción en el que un flujo de biogás a alta presión ingresa en una columna de absorción donde el dióxido de carbono y algunas otras impurezas, incluido el sulfuro de hidrógeno, se eliminan mediante dilución en agua que cae desde la parte superior del recipiente en la dirección opuesta al flujo de gas. El metano no se elimina porque tiene menos capacidad de dilución. El agua que se usa en el proceso de lavado se elimina en un recipiente separado para volver a usar, haciendo de este sistema un circuito cerrado que mantiene bajo el consumo de agua [27],[25],[28].

- **Lavado de aminas**

El lavado con aminas se basa en el mismo mecanismo que el lavado con agua, en un proceso de absorción física en la que tanto el  $\text{CO}_2$  como el  $\text{H}_2\text{S}$  son más solubles que el metano en el solvente. En comparación con el agua, el solvente aumenta las tasas de absorción de  $\text{CO}_2$  y, por lo tanto, permite disminuir las tasas de circulación de líquido de absorción. Además, la humedad, el  $\text{H}_2\text{S}$ , y los NMOC también se eliminan cuando se lava el biogás en un solvente como el Selexol [27],[25],[28].

- **Tamiz molecular o adsorción por oscilación de presión**

Los procesos de tamiz molecular absorbentes especiales como zeolitas y el carbón activado; los compuestos gaseosos se retienen en la superficie de los sólidos (adsorbentes) y quedan atrapados por el tamaño del tamiz molecular. Una planta típica de tamiz molecular emplea

etapas de compresión, eliminación de humedad y eliminación de sulfuro de hidrógeno. Además del  $\text{CO}_2$ , otras moléculas como el  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$  y  $\text{H}_2\text{O}$  pueden ser co-adsorbidas [27],[25],[28].

- **Separación de membrana**

La separación de membrana aprovecha las diferentes permeabilidades de los compuestos de gas reteniendo los compuestos que se desean y permitiendo el flujo de los demás. Este proceso aprovecha la propiedad física de los gases, en las mismas condiciones, pasaran a través de membranas poliméricas a velocidades diferentes. Una planta típica de biogás emplea pasos de compresión, eliminación de humedad y eliminación de sulfuro de hidrógeno, pero depende del carbón activado para eliminar los NMOC y las membranas para eliminar el dióxido de carbono [27],[25],[28].

### **3. PROPUESTA METODOLOGICA PARA UN SISTEMA DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS**

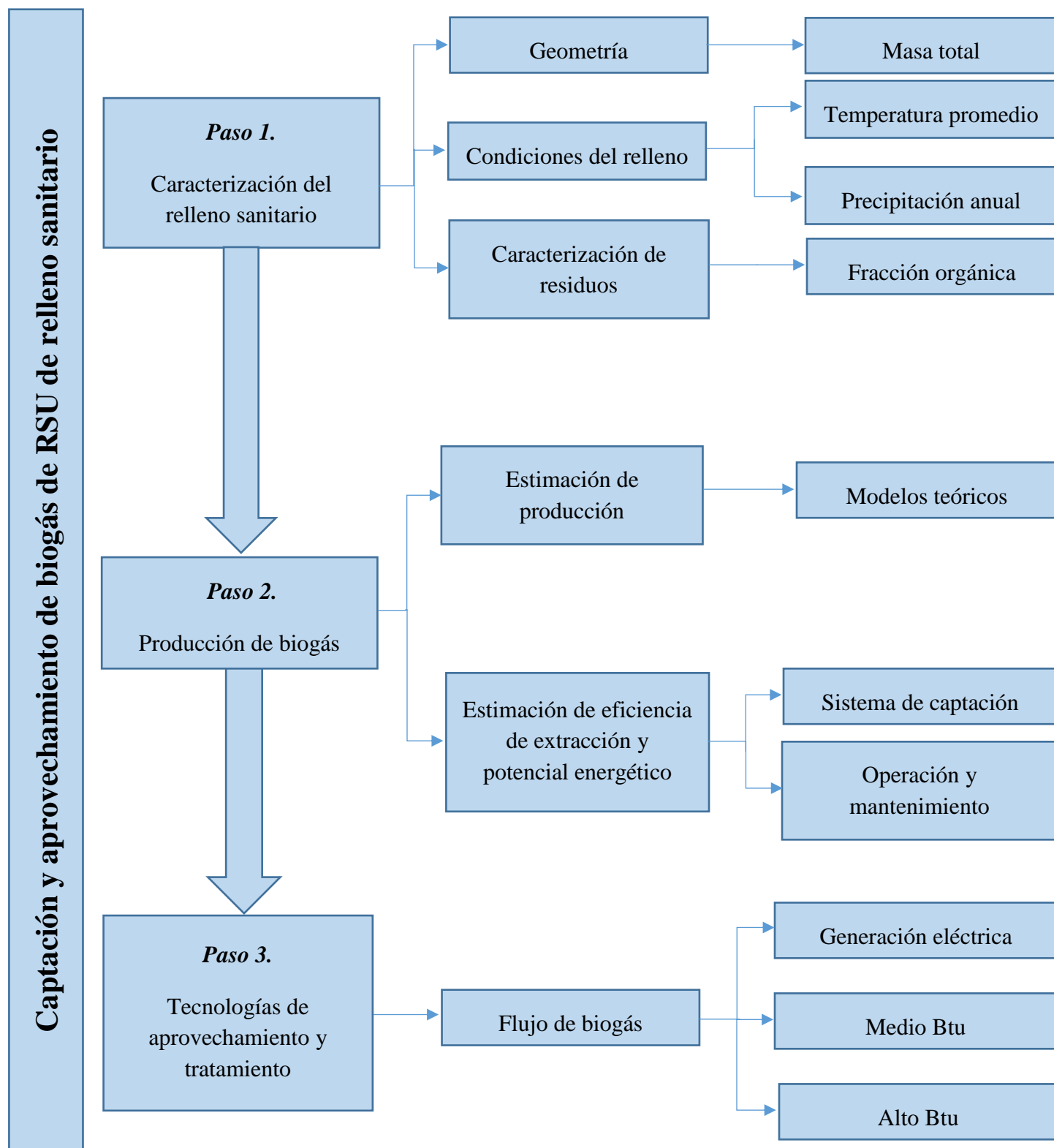
A continuación, se presenta la metodología propuesta para el diseño conceptual de una planta de aprovechamiento de biogás proveniente de rellenos sanitarios. En la metodología se incluyen las etapas de caracterización del relleno sanitario, estimación de generación, extracción y potencial energético disponible del biogás y tecnologías de aprovechamiento, además de la información requerida en cada una de ellas.

Como primer paso es importante definir las condiciones del relleno sanitario con el fin de determinar las variables propias del sitio que permitirán establecer estimaciones más cercanas a las llevadas a cabo en el proceso real del depósito, a su vez, nos proporcionará un mayor entendimiento del entorno en que se desarrolla la generación de biogás. Las principales variables para iniciar el estudio son: geometría del relleno, condiciones ambientales y caracterización de residuos.

Como siguiente paso se estimará la producción de biogás, que está ligada a parámetros propios del relleno sanitario como tipo de residuos allí depositados; recordemos que la materia orgánica es la encargada de la degradación y posterior generación de biogás. Dicha estimación se podrá llevar a cabo utilizando los modelos teóricos presentados previamente, sin embargo, para el desarrollo de la metodología se empleará el modelo colombiano de biogás, que es un método confiable y desarrollado específicamente para este país, su implementación se explica en el Anexo 1.

Finalmente haciendo uso de la información obtenida a través de los modelos de estimación, se evalúa el flujo de biogás generado en diferentes alternativas tecnológicas, entre las que se encuentran proyectos de generación eléctrica, uso directo como gas de medio y alto Btu en función de la tecnología conveniente para dicho flujo y proponer tecnologías de tratamiento que permitan el correcto funcionamiento de los equipos en la implementación del proyecto.

En la Figura 6 se presenta la metodología propuesta y cada una de las etapas mencionadas anteriormente y que serán descritas con mayor detalle en este capítulo.



*Figura 6. Metodología para el diseño de extracción y aprovechamiento de biogás [los autores].*

### **3.1. PASO 1: CARACTERIZACIÓN DEL RELLENO SANITARIO**

En esta parte se tratará la información necesaria para llevar a cabo la caracterización del relleno sanitario, teniendo en cuenta aquella información requerida para realizar el cálculo de la estimación de generación de biogás por medio de los modelos teóricos tratados en el capítulo anterior. Para llevar a cabo la caracterización del relleno es necesario reconocer las condiciones del lugar en el que se encuentra ubicado, tales como: temperatura, nivel de pluviosidad, geometría del relleno y caracterización de los RSU que son depositados en el sitio.

*La geometría del relleno sanitario* no es un aspecto que dependa únicamente de las dimensiones del lugar, por el contrario, esta dependerá de la topografía del lugar y nivel freático, no obstante, los rellenos estudiados en la actualidad ya cuentan con una geometría definida por lo que conocer su capacidad volumétrica es más sencillo. En el proceso de cálculo del volumen de RSU depositados se debe estimar el volumen de cobertura usado en el relleno, el cual se puede calcular como el 15 al 25% del volumen total de disposición, para efecto de una estimación más precisa se debe remitir a las especificaciones técnicas del relleno sanitario, o en su defecto a las normativas colombianas para las capas de cobertura. Para la determinación de la masa total de residuos se debe tener en cuenta la densidad de los mismos y a su vez los equipos de compactación que son empleados, un valor de referencia para la densidad de un relleno estabilizado está entre 0,6 y 1 tonelada por m<sup>3</sup>. Para tener una idea más acertada sobre la producción de biogás se debe contar con una proyección de los residuos recibidos en el relleno para de este modo estimar la vida útil del mismo.

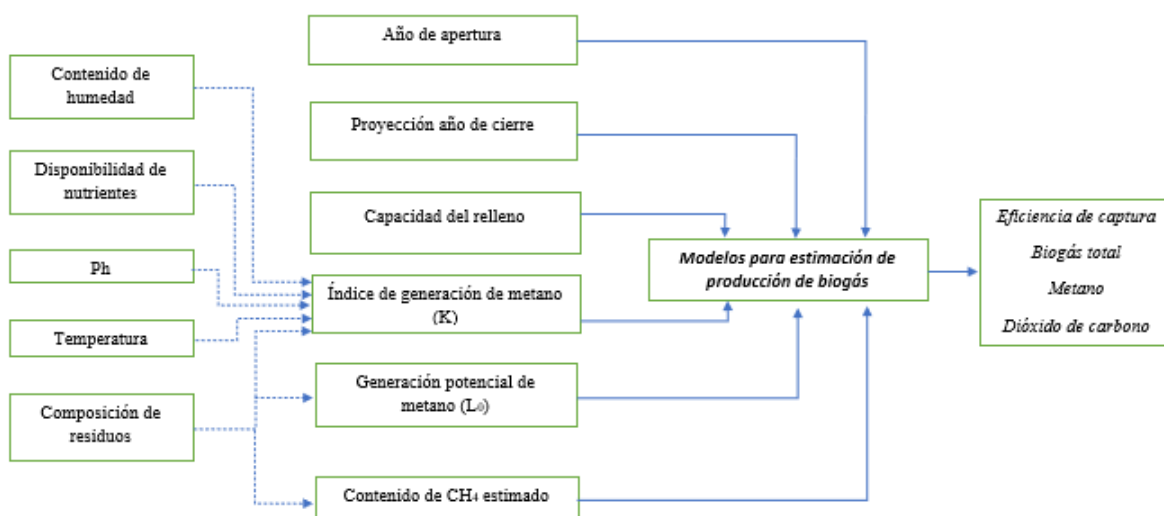
*Las condiciones del relleno* hacen referencia a una serie de factores físicos que influyen directamente en la producción de biogás, de lo más relevantes están la temperatura y humedad de los RSU. Por lo general la temperatura de un relleno sanitario es superior a la del ambiente puesto que en su interior ocurren reacciones exotérmicas, por otro lado, la humedad de la fracción orgánica que va a degradarse depende del agua de las precipitaciones producidas en el sitio.

*La caracterización de los RSU* se requiere con el fin de conocer la fracción de residuos orgánicos presentes en la mezcla, ya que de estos depende la velocidad de degradación y por lo tanto la disponibilidad de biogás a través del tiempo. Para la caracterización se tienen normativas y estándares internacionales como el ya mencionado anteriormente, ASTM D 5231-92, o en Colombia el decreto 828 de 2005 que establecen una serie de procedimientos para determinar las características cualitativas y cuantitativas identificando su contenido y propiedades.

### **3.2. PASO 2: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS**

Es fundamental para la implementación de un proyecto de aprovechamiento de biogás conocer la cantidad, potencial energético y disponibilidad a través del tiempo del gas, con el fin de iniciar un proyecto con la tecnología y procesos adecuados para su utilización, evaluando la factibilidad y los beneficios potenciales de capturar dicho gas; el proceso de generación del biogás es complejo debido a la composición de los RSU depositados, además, para su estimación se requiere de información precisa, sin embargo, dicha estimación de generación debe ser ajustada teniendo en cuenta las características propias del diseño del sistema de captación implementado o que se desea implementar, al igual que las prácticas de gestión del sitio.

*Estimación de producción de biogás.* Una vez se ha realizado la caracterización del relleno sanitario, los resultados obtenidos se reemplazan en la ecuación de degradación cinética de primer orden del modelo teórico correspondiente. Es importante tener en cuenta que, para la aplicación de los modelos teóricos para la estimación de producción de biogás se debe contar con información precisa acerca del relleno sanitario, si se es externo al estudio se debe hacer énfasis en la recolección de la información teniendo como aspectos relevantes los presentados en la Figura 7.



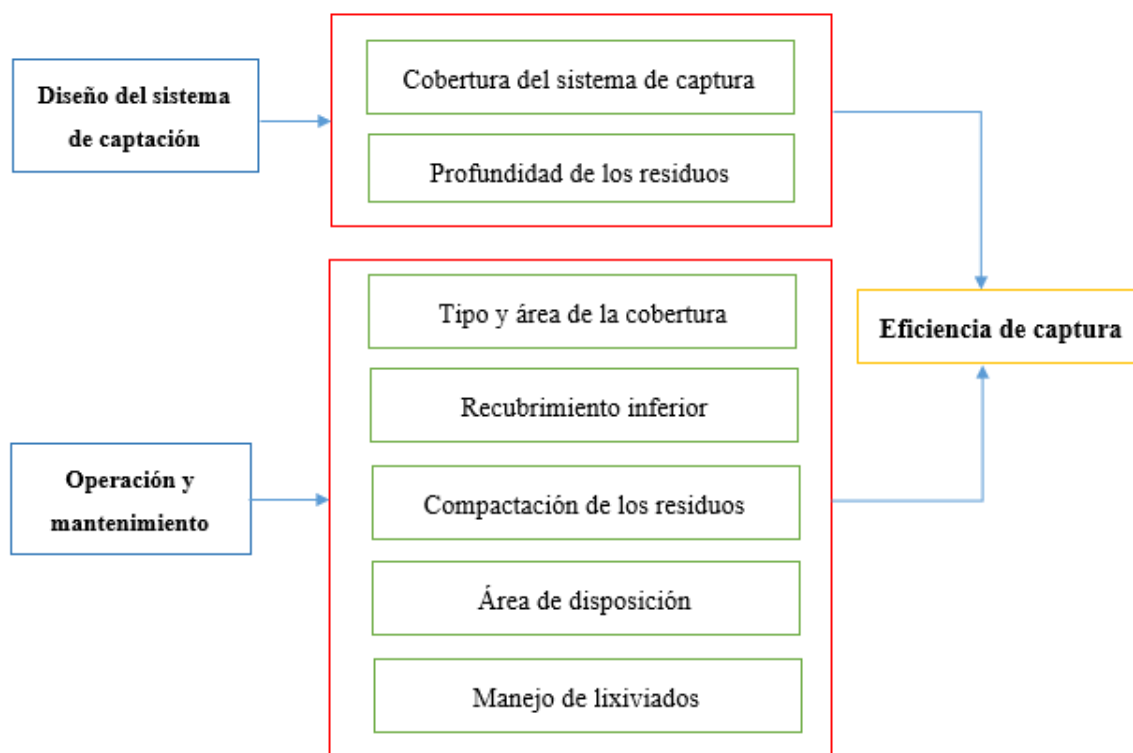
*Figura 7. Diagrama de factores influyentes en los modelos para estimar la producción de biogás [los autores].*

En la Figura 7, se presentan una serie de variables necesarias para la estimación de producción de biogás mediante el modelo colombiano, el cual ha sido desarrollado para las condiciones propias de las diferentes regiones del país. En la segunda columna del diagrama se muestran las condiciones de entrada necesarias para el cálculo de la proyección de producción de biogás como lo son año de apertura, año de proyección de cierre, capacidad del relleno, índice de generación de metano, generación potencial de metano y contenido de CH<sub>4</sub> estimado; los valores de índice de generación de metano y generación potencial de metano son asignados automáticamente por el modelo basándose en el clima que ha sido categorizado en cinco regiones y la composición de residuos suministrada por el usuario; en la primera columna se tienen los factores influyentes en las condiciones anteriores, por lo que su valor es determinante en el proceso de degradación de los RSU aunque estos no son requeridos directamente por la hoja de cálculo del modelo colombiano pero han sido tenidos en cuenta en los factores que son asignados por el modelo para cada una de las regiones.

***La estimación de la eficiencia de extracción y potencial energético disponible.*** La eficiencia de recolección de biogás generado en el relleno sanitario depende de diversos factores, que pueden ser agrupados en el diseño del sistema de captación y los métodos



tanto de operación como mantenimiento que se llevan a cabo. Los factores a tener en cuenta para el cálculo de la eficiencia se deben revisar para su actualización a través del tiempo. En la Figura 8 se presentan los factores relacionados con el diseño del sistema de captación y operación y mantenimiento del sitio.



*Figura 8. Diagrama de factores para el cálculo de la eficiencia del sistema de captura [los autores].*

En la Figura 8 se agruparon las condiciones que intervienen en el cálculo de la eficiencia del sistema de captura del biogás generado, este porcentaje se aplica por el modelo a la cantidad de biogás generado para estimar cuanto de este puede ser recuperado para uso benéfico. En el diseño del sistema de captación independientemente de la configuración que se elija para las tuberías su eficacia depende del área de extensión del sistema de pozos y la profundidad de los residuos teniendo en cuenta que pozos poco profundos son menos eficientes y propensos a infiltración de aire, contrario a pozos con mayor profundidad que

pueden tener un radio de influencia mayor, aplicación de mayor succión y, por lo tanto, abarcar mayor volumen de residuos. Las prácticas de gestión en lo operativo y mantenimiento del lugar permitirán alcanzar al sitio las características para tener la eficiencia esperada para los rellenos sanitarios, dichas características se aprecian en la figura anterior comenzando por el tipo y área de cobertura que impiden que los gases escapen a la atmósfera y que se presente infiltración de aire y lluvia en los residuos aumentando el nivel de lixiviados por lo que su permeabilidad y espesor se deben considerar; el recubrimiento inferior evita la migración del biogás a áreas circundantes; la compactación de los residuos contribuye a la degradación anaeróbica y mejora la captación limitando la infiltración de aire; el área de disposición específica donde los camiones descarguen los residuos permiten un mejor manejo de los residuos y por último el adecuado manejo de lixiviados previene la obstrucción de las perforaciones de las tuberías permitiendo la aplicación de vacío en el sistema.

El valor numérico de la eficiencia podrá ser calculado como el producto de los factores enumerados anteriormente. Sin embargo, la obtención de dicha información para algunos rellenos sanitarios podría ser compleja. En la Tabla 5 se presentan valores de captación de biogás promedio basados en el tipo de cobertura del relleno y el diseño del sistema de captación que se tiene o planea desarrollar, estos valores son tomados basándose en la literatura existente.

*Tabla 5. Eficiencia promedio de recolección de biogás basada en métodos de operación. Adaptado de [29].*

<b>Descripción</b>	<b>Eficiencia de recolección promedio (%)</b>
Vertedero activo con sistema de captación de pozos verticales y cobertura diaria	67
Vertedero activo con sistema de captación de pozos verticales y cobertura intermedia	75
Vertedero activo con sistema de captación de pozos verticales y cubierta final	87
Vertedero activo con sistema de captación de pozos verticales y trincheras horizontales y cubierta final	87
Vertedero activo con sistema de captación vertical y geomembrana	90

A partir de la cantidad de biogás captado en un relleno sanitario, se procede al cálculo del poder calorífico, que es una medida del contenido energético del combustible. El poder calorífico depende de la fase del H<sub>2</sub>O en los productos y recibe el nombre de Poder Calorífico Superior (PCS) cuando el H<sub>2</sub>O está en estado líquido y Poder Calorífico Inferior (PCI) cuando el H<sub>2</sub>O en los productos está en forma de vapor.

Para obtener el poder calorífico inferior del biogás es necesario el cálculo del poder calorífico del CH<sub>4</sub>, ya que este se encuentra en mayor proporción en el biogás y es el compuesto de mayor liberación de energía cuando se requiere quemar el combustible para su aplicación. El poder calorífico inferior del CH<sub>4</sub> es de 35846.071 [kJ/m<sup>3</sup>], la Ec. 6 muestra la relación entre el poder calorífico inferior del biogás y el contenido de CH<sub>4</sub>.

$$PCI_{BG} = \%CH_4 * PCI_{CH_4} \quad (Ec. 6)$$

### 3.3. PASO 3: TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO Y TRATAMIENTO

Una vez se conoce la estimación de biogás captado se presentan diferentes alternativas tecnológicas para el gas del relleno sanitario. Para la elección del sistema de aprovechamiento se tiene como parámetro de selección el flujo de biogás estimado a través de los modelos matemáticos como *LandGEM* y el modelo colombiano de biogás; se debe tener presente que los rangos de flujo de biogás son valores típicos para proyectos de dichas características, pero no son una limitante para el uso en otras tecnologías. La viabilidad económica del proyecto para permitir su funcionamiento es un factor fundamental en su configuración. Dicha viabilidad económica depende en gran medida de aspectos externos, ejemplo de ello son el precio al que se puede comercializar la electricidad, la cercanía que se tiene con industrias potencialmente interesadas, los requerimientos de flujo de los clientes, entre otros, que no son del alcance de este trabajo de investigación.

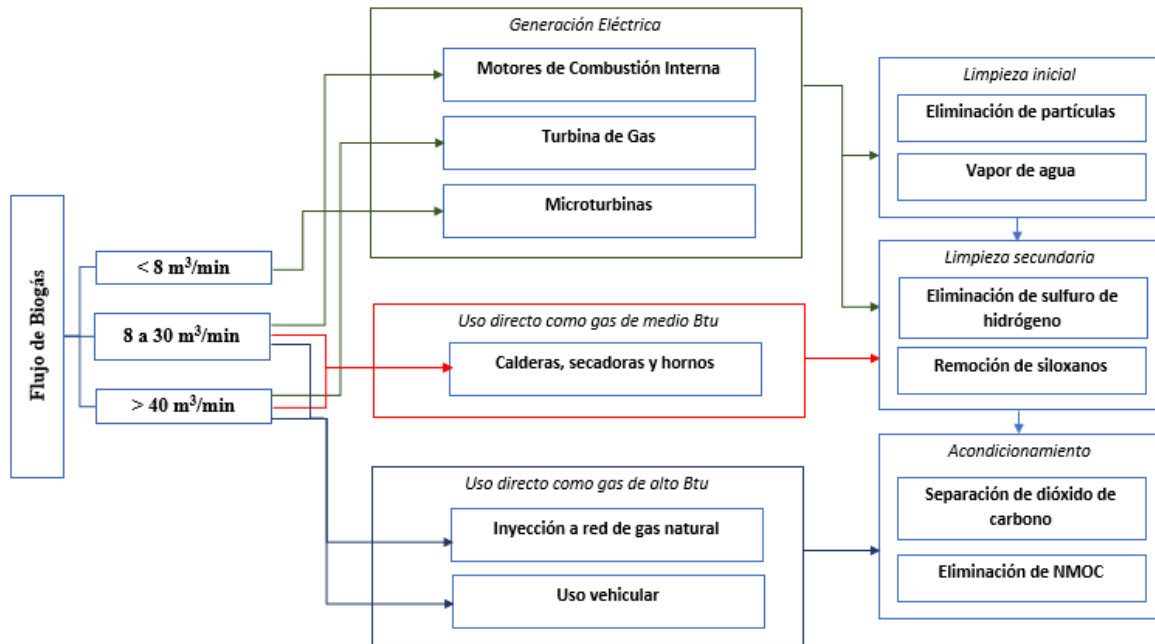


Figura 9. Diagrama de selección de tecnología de aprovechamiento y tratamiento requerido [los autores].

La Figura 9 permite, a partir del flujo de biogás calculado en el paso anterior proponer y seleccionar diferentes tecnologías y usos como la generación eléctrica, uso directo como gas de medio y alto Btu y en función de la tecnología elegida reconocer los tratamientos necesarios para la eliminación de contaminantes que no permitan el adecuado funcionamiento de los equipos instalados. Los tratamientos han sido clasificados en tres grupos teniendo en cuenta la complejidad de la tecnología requerida para la limpieza del gas. Los equipos destinados para la generación eléctrica como las turbinas, motores de combustión interna y microturbinas son tolerantes a los compuestos traza, por lo que no es necesario llevar a cabo una limpieza exhaustiva, sin embargo, un gas de calidad superior reduciría los costos de mantenimiento obligando así a encontrar un punto de equilibrio entre los costos de la limpieza y mantenimiento. Equipos como calderas, secadoras y hornos destinados a la utilización directa del biogás como combustible, requieren una limpieza profunda, con el fin de evitar la afectación de componentes como tuberías por acción del efecto corrosivo de compuestos como los siloxanos, incrementado la complejidad del proceso de remoción de estos. En aplicaciones de uso vehicular o

inyección a la red de gas natural, además de la eliminación de contaminantes por medio de tratamientos de limpieza primarios y secundarios se requiere incrementar el contenido de  $\text{CH}_4$  elevando el contenido energético, haciéndose necesaria la eliminación del dióxido de carbono.

#### 4. CASO DE ESTUDIO RELLENO SANITARIO LA GLORITA

A continuación, se presenta un caso de análisis para la técnica de aprovechamiento energético de biogás de relleno sanitario siguiendo la metodología propuesta en el capítulo anterior tomando como lugar de estudio el relleno sanitario La Glorita ubicado en la ciudad de Pereira perteneciente al departamento de Risaralda, para dicho caso de estudio se propone una alternativa tecnológica configurando un escenario de estudio que provea las herramientas necesarias para abordar proyectos similares en el país.

#### 4.1. CARACTERIZACIÓN DEL RELLENO SANITARIO LA GLORITA

El relleno sanitario la Glorita se encuentra ubicado en la ciudad de Pereira, Risaralda a 1411 msnm, en el centro de la región occidental del territorio colombiano, con una población estimada de 488839 personas.

El relleno sanitario La Glorita se ubica específicamente en Combia, actualmente es una de las veredas de la ciudad de Pereira, en la Figura 10 se muestra la ubicación geográfica precisa. Un total de 24 municipios de Risaralda, Norte del Valle, Viterbo (Caldas) y en ocasiones municipios de Quindío descargan un promedio diario de 800 toneladas en el relleno. La apertura del sitio tuvo lugar en 1997 y se proyecta su clausura en el año 2033, con posibilidad de ampliación.



*Figura 10. Ubicación geográfica del relleno sanitario La Glorita de Pereira. Tomado de [30].*

**Geometría del relleno**, la geometría de este relleno sanitario es de tipo trinchera o zanja que consiste en excavaciones de determinadas dimensiones las cuales se recubren con una membrana de baja permeabilidad para evitar la infiltración al suelo de líquidos percolados y a su vez cuenta con una red de drenajes. Su ancho y altura lo determina las características del terreno (hidrogeológicas) y la vida útil que espera tener el relleno. En la Figura 11 se aprecia uno de los vasos en los cuales se realiza la disposición de residuos.



*Figura 11. Geometría de relleno sanitario tipo trinchera o zanja. Tomado de [31].*

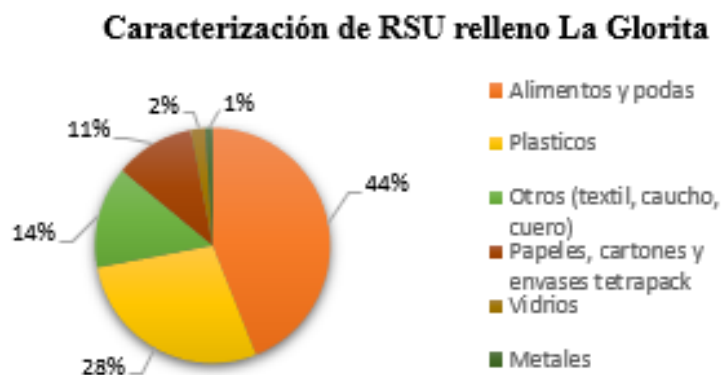
**Condiciones del sitio**, el departamento de Risaralda está ubicado en la zona central de la región Andina, centro occidente de Colombia con una tendencia climática muy húmeda presentando en los meses más lluviosos precipitaciones promedio de 3000 mm/año. El municipio de Pereira presenta temperaturas promedio de 21°C y precipitación media anual de 2750 mm.

**Caracterización de los residuos sólidos**, la determinación de la composición física se realiza mediante la selección manual de los materiales depositados en la zona determinada para la caracterización, una vez allí se realiza un esparcimiento y se procede a realizar una selección manual. Posteriormente se seleccionan los materiales y se registran. Los grupos de residuos en que se realiza la separación es la siguiente:

- Residuos orgánicos biodegradables.
- Productos de papel y productos de cartón.
- Plásticos.
- Textiles.

- Metales ferrosos compuestos de aluminio y otros metales no ferrosos.
- Vidrio.
- Madera, caucho (goma), cuero, ceniza, rocas y escombros, huesos y otros.

Para el cálculo del porcentaje en peso de los residuos ya seleccionados de acuerdo al tipo, se realizó en dos partes; se analizó el contenido de los residuos inorgánicos que se caracterizaron durante siete días de muestreo; de igual manera los residuos inorgánicos y orgánicos, este último tipo de residuos se caracterizó durante tres días consecutivos. La medida anterior se adoptó con el fin de conocer de manera aproximada la fracción orgánica de los RSU extrapolando los resultados de los tres días con los de siete días debido a que los residuos orgánicos presentan un alto grado de mezcla con otros materiales lo que dificulta su separación. La caracterización de los RSU se presenta en la Figura 12.



*Figura 12. Caracterización de RSU en el relleno sanitario La Glorita [32].*

La determinación de la densidad de los residuos se calcula de acuerdo al peso unitario, generalmente, se dispone un cilindro con un determinado volumen, en este caso de 55 gal y se depositan allí los residuos, se dejan por un tiempo de asentamiento que es regularmente 24 horas, finalmente se pesa el cilindro y se realiza el cálculo de la densidad mediante la Ec 7.



$$\rho = \frac{m}{v} \quad (Ec. 7)$$

donde:

$\rho$ : densidad

$m$ : masa de los residuos sólidos.

$v$ : volumen del residuo sólido.

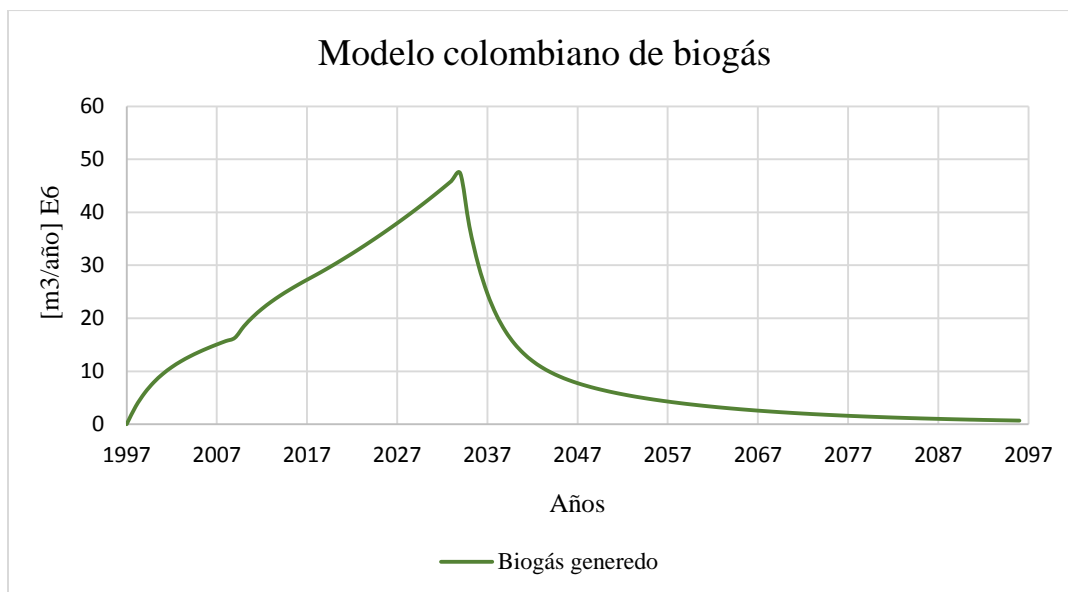
El valor de la densidad medida en campo de los residuos que ingresan en el relleno sanitario fue de 335 kg/m<sup>3</sup> y un peso específico de 3285,49 N/m<sup>3</sup>, el cual es un valor elevado teniendo en cuenta que la humedad promedio de los residuos que ingresan al relleno sanitario fue 76%.

## 4.2. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

El proceso de degradación anaeróbica de los residuos orgánicos depositados en el relleno sanitario es modelado por una ecuación de primer grado, dicha ecuación estima la generación de biogás para múltiples años variando la proyección anual de residuos e iterando la ecuación, el modelo de estimación proporciona igualmente un valor porcentual de eficiencia del sistema de captura instalado en el lugar basándose en las respuestas del usuario en la hoja de “Alimentación”. Ver anexo 1.

- **Estimación de producción de biogás**

Haciendo uso de la información obtenida en el *numeral 4.1*, correspondiente a la caracterización del relleno sanitario en la que se incluye además la caracterización física de los RSU, se procede al cálculo de la estimación de producción de biogás por medio del modelo colombiano de biogás.

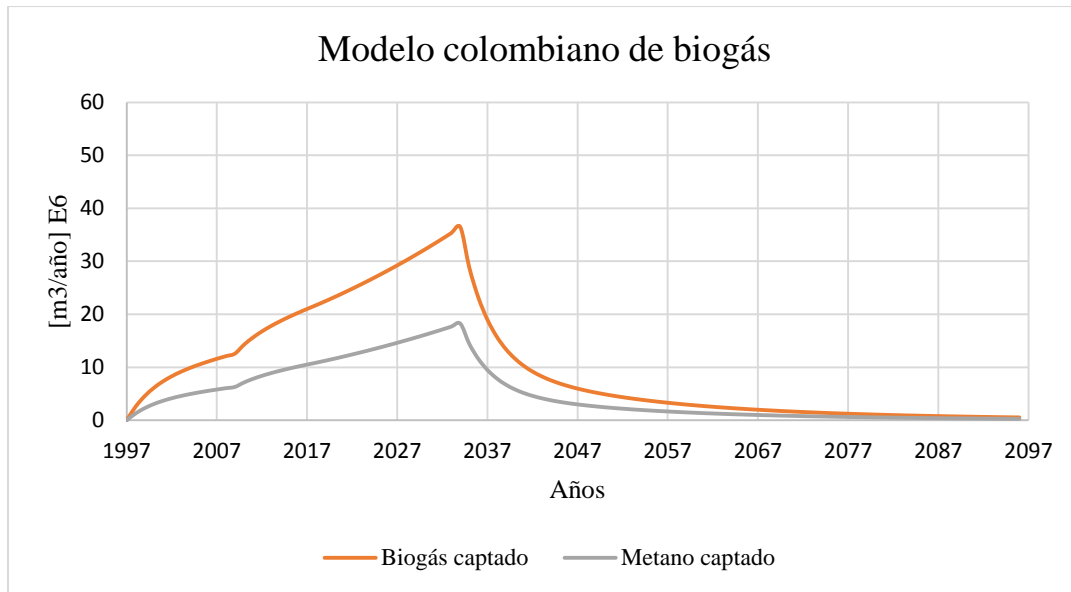


*Figura 13. Estimación de biogás generado en el relleno La Glorita.*

Los resultados presentados en la Figura 13, muestran que la curva de generación de biogás crece hasta un valor máximo de 47,34 E6 m<sup>3</sup>/año para el año posterior a su clausura, a partir de allí la generación de metano disminuye, debido a que la fracción de residuos orgánicos ya se encuentra en avanzado estado de descomposición y sólo se mantienen los residuos de degradación lenta como papel, cartón, textiles, madera, caucho, entre otros. En el Anexo 1 se muestra los resultados de generación para los diferentes años.

- **Estimación de la eficiencia de extracción y potencial energético disponible**

En el numeral anterior se realizó el cálculo de la estimación de generación de biogás por medio del modelo colombino, sin embargo, dicha estimación debe ser ajustada para obtener un valor cercano del que se puede disponer para su posterior utilización en tecnologías de aprovechamiento. En la Figura 8, se presentaron los factores que se deben tener en cuenta para el cálculo de la eficiencia de captación del sistema. El procedimiento detallado para el cálculo de la eficiencia se encuentra en el Anexo 1.



*Figura 14. Estimación de Biogás y metano captado en el relleno La Gloria.*

El valor de la eficiencia obtenido con base al diseño del sistema de captación, la operación y mantenimiento que se realizan como parte del sistema de gestión del lugar, fue de 77% arrojando un valor de 36,45 E6 m<sup>3</sup>/año de biogás captado como se muestra en la Figura 14. El contenido de metano en el biogás es asumido en el modelo de estimación como el 50%, dando como resultado de metano captado 18,23 E6 m<sup>3</sup>/año en el año de mayor rendimiento.

El potencial energético disponible en el biogás proporcionará una referencia de su valor a nivel energético. El cálculo del poder calorífico del biogás será útil para determinar la energía que este puede liberar en forma de calor si se requiere quemar para su aplicación. El PCI del CH<sub>4</sub>, necesario para realizar el cálculo del poder calorífico inferior del biogás.

$$PCI_{BG} = \%CH_4 * PCI_{CH_4}$$

$$PCI_{BG} = 0,5 * 35846,071 \frac{kJ}{m^3} = 17923,0 \frac{kJ}{m^3}$$

### 4.3. TECNOLOGÍAS PARA APROVECHAMIENTO Y TRATAMIENTO

La clasificación de las tecnologías se lleva a cabo teniendo en cuenta el contenido de  $\text{CH}_4$  y presencia de agentes contaminantes en el biogás. Como se muestra en la Figura 9, el parámetro de selección para la tecnología de aprovechamiento es el flujo de biogás captado del relleno sanitario, el cual ha sido estimado por medio del modelo colombiano de biogás. La cantidad estimada de biogás captado del relleno sanitario La Glorita fue 36,45 E6  $\text{m}^3/\text{año}$ . Basándose en la Figura 9, se obtiene que puede ser utilizado en aplicaciones de generación eléctrica y uso directo como gas de medio Btu. Para el desarrollo del escenario de aprovechamiento se estudiará la generación eléctrica mediante el uso de una turbina de gas.

Para la implementación de la alternativa tecnológica mencionada anteriormente se hace necesario la aplicación de tratamientos de tipo primario y secundario con el fin de eliminar partículas, vapor de agua, eliminación de sulfuro y siloxanos que reducen el contenido energético del biogás y no permiten cumplir con las especificaciones técnicas de los equipos. En el *numeral* 2.8 se presentaron las tecnologías de tratamiento utilizadas actualmente en la industria de limpieza de biogás, la tecnología adecuada será aquella que se adapte a las condiciones específicas del relleno sanitario de estudio, incluyendo los aspectos económicos, instalación, mantenimiento y operación.

#### Escenario de estudio: Turbina de gas



*Figura 15. Conjunto generador impulsado por turbina de gas. Tomado de [33].*

Las turbinas de gas operan generalmente en un ciclo abierto, y lucen generalmente como se ilustra en la Figura 15, estas renuevan el fluido que pasa a través de ella. El ciclo termodinámico que modela el funcionamiento de estas máquinas térmicas es el ciclo Brayton. Para realizar la simulación de generación de potencia por medio de una turbina de gas, se utilizó el software *Cycle Tempo*, este programa permite diseñar, analizar y optimizar las condiciones termodinámicas de un sistema. Los parámetros de la simulación se presentan en la Tabla 6.

*Tabla 6. Condiciones iniciales para la simulación del ciclo Brayton.*

Parámetro	Descripción
Composición combustible	50% CH <sub>4</sub> 45% CO <sub>2</sub> 5% N <sub>2</sub> <1 H <sub>2</sub> S
Eficiencia de compresor	85%
Relación de presión	95%
Flujo de aire de entrada	26 kg/s
Exceso de aire	4.46
Número de ejes	2

Para tomar estos parámetros se consideraron valores típicos de eficiencia en turbinas de este tipo, principalmente en las turbinas de gas SOLAR, las cuales son turbinas de dos ejes que unen compresor-turbina y turbina-generator, con velocidades de 15000 y 10000 rpm, respectivamente. Los gases de combustión salen a una elevada temperatura que podría ser utilizada por el relleno sanitario dependiendo el tipo de necesidad específica, principalmente el objetivo es la generación de energía eléctrica para el sitio.

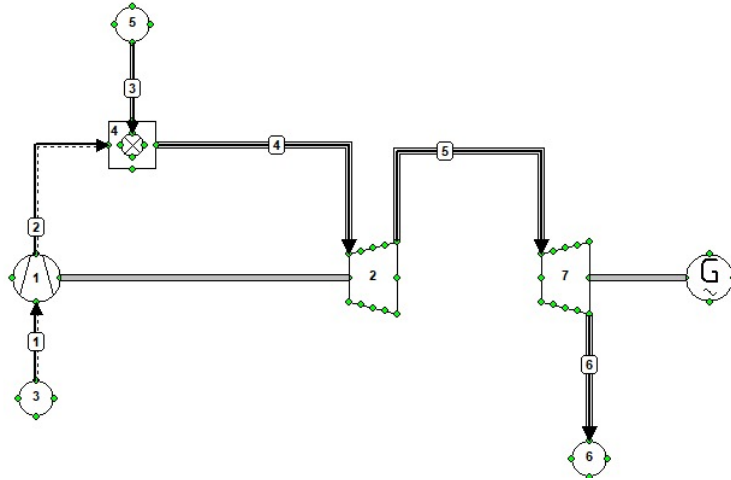


Figura 16. Diagrama esquemático ciclo Brayton.

En la Tabla 7 se presentan los diferentes componentes del ciclo ilustrado en la Figura 16, allí se puede relacionar la numeración del proceso y visualizar los componentes a los que se hace referencia.

Tabla 7. Descripción de componentes del ciclo Brayton.

Componentes	Descripción
1	Compresor
4	Cámara de combustión
2	1° Etapa de turbina
7	2° Etapa de turbina
G	Generador
3, 5, 6	Simulan entradas y llegadas de productos en el proceso (sumideros)
Líneas	Descripción
1 y 2	Aire
3	Biogás
4, 5 y 6	Gases de combustión
Sin numeración	Eje

Para motivos de estudio se ha seleccionado el ciclo Brayton para ilustrar que tanta energía eléctrica se puede generar con biogás de dicha composición y poder calorífico, claramente las alternativas se deberán evaluar desde diferentes puntos de vista como lo son el económico, mantenibilidad, retorno de inversión, rentabilidad y demás aspectos que se deben considerar cuando se pretende abordar un proyecto. Existen diversas alternativas para este tipo de fuente de aprovechamiento como lo son turbinas más pequeñas o de menos capacidad, esto dependerá de la potencia que se consuma en el relleno sanitario y la posibilidad existente de comercializar energía eléctrica a compañías cercanas y porque no, a la red comunitaria en el caso de Pereira de la energía producida por la hidroeléctrica.

El software *Cycle Tempo* puede simular las condiciones termodinámicas de sistemas de energía que quieren ser diseñados o, por otro lado, que ya se encuentren existentes y funcionando. En este trabajo, se hace uso de la licencia estudiantil para la Universidad Tecnológica de Pereira, empleando esta herramienta para la simulación de un ciclo Brayton, donde el combustible será el biogás con las características de este mismo generado en el relleno sanitario la Glorita de la ciudad de Pereira.

En el proceso de combustión existen variables tan importantes como lo es la cantidad de aire de la combustión. Lo que se busca en un proceso de combustión es que sea completa y por lo tanto el combustible genere  $\text{CO}_2$ , y el hidrógeno  $\text{H}_2\text{O}$ . En caso de existir azufre, este genere  $\text{SO}_2$ , caso contrario ocurre en las combustiones incompletas que contienen en sus productos componentes no quemados compuestos como C,  $\text{H}_2$ , CO u OH.

El oxígeno insuficiente puede tener como consecuencia una combustión incompleta, sin embargo, una cantidad exagerada de aire también produce el mismo efecto. En los procesos de combustión reales se acostumbra a usar cantidades de aire en exceso, esto con el fin de aumentar la eficiencia de la combustión y ejercer un control en la temperatura de la cámara de combustión. El exceso de aire se da en porcentaje por encima de la cantidad de aire estequiométrico, el software permite variar este valor de exceso de aire para regular la temperatura y producir una combustión con mayor eficiencia.

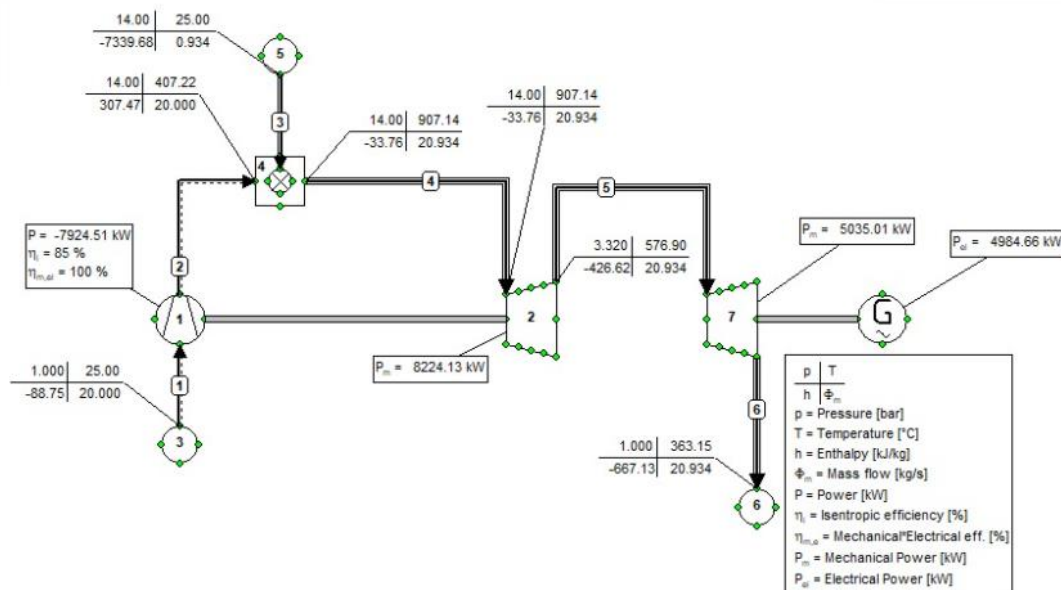


Figura 17. Simulación del ciclo Brayton en software Cycle Tempo.

Tabla 8. Resultados de simulación del ciclo de generación de potencia.

Descripción	Valor parámetro
Potencia eléctrica generada	4,98 MW
Flujo de biogás	$0,934 \frac{kg}{s}$
Temperatura gases de combustión	907,14 °C

Los resultados obtenidos por medio de la simulación arrojaron un valor de potencia eléctrica generada de 4,98 [MW] con un flujo másico de biogás de 0,934 kg/s, asumiendo un valor para la densidad del biogás de 1,2 kg/m<sup>3</sup> se tiene un flujo volumétrico de 2802 m<sup>3</sup>/h. La alta temperatura de los gases de combustión a la salida de la turbina de potencia hace que la energía que contiene pueda ser aprovechada para un mejor rendimiento de la turbina por medio de un intercambiador de calor a contraflujo transfiriendo calor desde los gases de combustión al aire a alta presión que sale del compresor. En el anexo 2 se muestra los parámetros relevantes para el uso del software.



Los proyectos de aprovechamiento energético marcan una línea base en la reducción del impacto ambiental causado en este caso por la emisión a la atmósfera de gas metano producto de la descomposición de los residuos generados en las ciudades, esta problemática involucra a diferentes sectores como lo son la industria privada, la academia y el gobierno, llevándolos a tomar las medidas necesarias que vayan en dirección a la regulación adecuada de estos sitios de acopio de residuos, de la misma manera, a la mitigación de estas emisiones nocivas.

## 5. CONCLUSIONES

En el relleno sanitario La Glorita de la ciudad de Pereira, se disponen los residuos sólidos de diferentes municipios del occidente del Eje Cafetero y el Norte del Valle, representando una alternativa de aprovechamiento energético, que genera beneficios desde el punto de vista ambiental, reduciendo las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera y generando utilidades con la generación de energía eléctrica.

Para la estimación de la generación de biogás en el relleno sanitario La Glorita, se usó el modelo colombiano de biogás, ya que este fue desarrollado tomando en cuenta las características específicas de clima, caracterización de residuos y prácticas de disposición de residuos en Colombia, además, que se deriva del modelo mexicano de biogás versión 2.0 por lo que tiene implícito el modelo LandGem, presentado en el desarrollo del marco teórico y el modelo de residuos 2006 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático.

El poder calorífico calculado es acorde a los resultados obtenidos en [3], en el cual se presenta un PCI de 20,22 MJ/kg en el relleno sanitario La Glorita de la ciudad de Pereira, dicho valor es ligeramente superior al obtenido en este trabajo de investigación, el motivo de dicha diferencia se da en el contenido de metano estimado en cada uno de los estudios, los cuales fueron de 54% y 50% respectivamente.

Los resultados obtenidos mediante la simulación del ciclo de generación de potencia con una turbina de gas en el software *Cycle Tempo* arrojaron una potencia eléctrica de 4,8 [MW] con un flujo de biogás requerido de 2802 m<sup>3</sup>/h, valores cercanos a los calculados mediante el software del modelo colombiano de biogás, que para generar una potencia similar requiere un flujo de biogás de 2928 m<sup>3</sup>/h. Teniendo en cuenta los valores obtenidos en la literatura, para que un proyecto de generación eléctrica utilizando turbinas de gas sea viable, se debe generar un mínimo de 3 MW sosteniendo flujos de biogás de aproximadamente 2200 m<sup>3</sup>/h, lo que muestra como clara alternativa el uso de tecnologías de aprovechamiento de biogás para el relleno sanitario La Glorita de la ciudad de Pereira.

Los modelos de estimación de generación de biogás para la cuantificación del potencial energético del gas de relleno sanitario, presentados como parte de los objetivos específicos de este estudio, muestran la viabilidad desde el punto de vista técnico de la implementación de un proyecto de aprovechamiento energético, siendo necesaria la implementación de

tratamientos para la remoción de partículas y siloxanos que pudieran afectar el rendimiento de la turbina de gas.

El software para el modelo colombiano de biogás, es una herramienta apropiada para la estimación de generación y eficiencia de captación de biogás. Es versátil en el sentido en que permite variar parámetros como la caracterización de los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario. En beneficio notable, los valores que alimentan este modelo, en su gran mayoría son valores y parámetros manejados por los rellenos sanitarios de Colombia, por lo que la información que se debe obtener, no representará un desafío para quien solicite realizar este tipo de análisis.

Los resultados obtenidos mediante el modelo colombiano de biogás, son acordes a los presentados en la literatura de trabajos de investigación consultados en revistas científicas.

Como conclusión, se tiene que la disminución en el impacto ambiental generado por la liberación de gas metano a la atmósfera es una actividad importante, por lo tanto, se deben adoptar para su mitigación alternativas tecnológicas adecuadas. Actualmente en diferentes países existen procesos enmarcados dentro de las políticas de reducción de gases de efecto invernadero, que demuestran su compromiso con esta problemática. En Colombia se debe fomentar la investigación en este campo para abrir así las miras a proyectos que lleven al país a mantener en sus mínimos la contribución a este fenómeno, no obstante, no es una labor netamente académica, debe existir la unión tanto de la academia como de las empresas para contribuir en la adquisición de tecnología y desarrollo de proyectos que nos lleven a garantizar que estas iniciativas sean viables económica y ambientalmente.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] N. J. Themelis and P. A. Ulloa, “Methane generation in landfills,” *Renew. Energy*, vol. 32, no. 7, pp. 1243–1257, Jun. 2007, doi: 10.1016/j.renene.2006.04.020.
- [2] S. I. de S. P. Domiciliarios, “Informe de disposición final de residuos sólidos-2017,” 2018.  
[https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2018/Dic/2.\\_disposicion\\_final\\_de\\_residuos\\_solidos\\_-\\_informe\\_2017.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2018/Dic/2._disposicion_final_de_residuos_solidos_-_informe_2017.pdf).
- [3] Á. A. Andrade Morales, “Aprovechamiento energético de residuos sólidos urbanos,” Universidad tecnológica de Pereira-Facultad de ingeniería mecánica, 2018.
- [4] “Concejo de Bogotá D.C. - Doña Juana ¿hay solución?” <http://concejodebogota.gov.co/dona-juana-hay-solucion/cbogota/2019-04-04/143533.php> (accessed Dec. 18, 2019).
- [5] D. Moratorio, I. Rocco, and M. Castelli Lemez, “Conversión de residuos sólidos urbanos en energía,” *Mem. Trab. Difusión Científica y Técnica*, vol. 10, no. 10, pp. 115–126, 2012.
- [6] M. del C. Ordoñez Ordoñez, “Evaluación de la generación de biogás en rellenos sanitarios en Colombia en el marco del protocolo de Kyoto,” Universidad Tecnológica de Pereira-Facultad de Tecnologías, 2011.
- [7] C. N. de P. E. y S. CONPES, “CONPES 3874-Politica Nacional Para La Gestión Integral De Residuos Solidos,” *Departamento Nacional de Planeación*, 2018.  
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3874.pdf>.
- [8] “European Commission | European Union.” [https://europa.eu/european-union/about-eu/institutions-bodies/european-commission\\_en](https://europa.eu/european-union/about-eu/institutions-bodies/european-commission_en) (accessed Dec. 11, 2019).
- [9] K. Noguera and J. Olivero-Verbel, “Los rellenos sanitarios en Latinoamerica: Caso Colombiano,” *Rev. la Acad. Colomb. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, vol. 34, no. 132, pp. 347–356, 2010.
- [10] Superintendencia de servicios públicos domiciliarios, “Disposición Final de

Residuos Sólidos Nacional Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – 2018 Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – 2018 Elaborado 2019,” p. 97, 2018.

- [11] L. A. Gómez Díaz, M. Hernández, J. F. Calvo Silva, and R. D. Gómez Vasquez, “Generación y caracterización del poder calorífico del biogás a partir de biomasa agrícola,” pp. 149–154, 2017, [Online]. Available: <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/3211>.
- [12] S. P. Singh, “Synthetic fuels: production and products.,” *Vet. Hum. Toxicol.*, vol. 27, no. 4, pp. 285–90, Aug. 1985, [Online]. Available: <https://www-accessengineeringlibrary-com.ezproxy.utp.edu.co/content/book/9780071490238/chapter/chapter12>.
- [13] S. Martín, “Producción y recuperación del biogás en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos análisis de variables y modelización: memoria de tesis doctoral,” Universidad de Oviedo, 1997.
- [14] E. F. Aghdam, C. Scheutz, and P. Kjeldsen, “Impact of meteorological parameters on extracted landfill gas composition and flow,” *Waste Manag.*, vol. 87, pp. 905–914, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2018.01.045.
- [15] S. L. Machado, M. F. Carvalho, J.-P. Gourc, O. M. Vilar, and J. C. F. do Nascimento, “Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results,” *Waste Manag.*, vol. 29, no. 1, pp. 153–161, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.02.017.
- [16] R. K. Pachauri *et al.*, “AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014 — IPCC,” *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2014. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> (accessed Jan. 07, 2020).
- [17] U. Epa and C. Change Division, “LFG Energy Project Development Handbook, Chapter 1: Landfill Gas Energy Basics.” Accessed: 08-Jan-2020. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>.
- [18] H. Willumsen and M. A. Barlaz, “Landfilling: Gas Production, Extraction and

- Utilization,” in *Solid Waste Technology & Management*, vol. 2, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2010, pp. 841–857.
- [19] T. Abbasi, S. M. Tauseef, and S. A. Abbasi, *Biogas Energy*. New York, NY: Springer New York, 2012.
- [20] Y. Camargo and A. Vélez, “EMISIONES DE BIOGAS PRODUCIDAS EN RELLENOS SANITARIOS,” 2009, [Online]. Available: [http://www.redisa.net/doc/artSim2009/TratamientoYValorizacion/Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios.pdf](http://www.redisa.net/doc/artSim2009/TratamientoYValorizacion/Emisiones%20de%20biog%C3%A1s%20producidas%20en%20rellenos%20sanitarios.pdf).
- [21] J. Pillai and C. Riverol, “Estimation of gas emission and derived electrical power generation from landfills. Trinidad and Tobago as study case,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 29, no. August, pp. 139–146, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.seta.2018.08.004.
- [22] U. Epa and C. Change Division, “LFG Energy Project Development Handbook, Chapter 2: Landfill Gas Modeling.”
- [23] V. Ludwing, Landfill Methane Outreach Program, and Agencia para la Protección del Ambiente (U.S. EPA), “Manual del Usuario Modelo Colombiano de Biogás Versión 1.0,” p. 29, 2009.
- [24] G. Blanco, E. Santalla, V. Córdoba, and A. Levy, “Generación de Electricidad a Partir de Biogás Capturado de Residuos Sólidos Urbanos: Un Análisis Teórico-Práctico,” *Div. Energía*, p. 52, 2017.
- [25] US-EPA: Climate Change Division, “LFG Energy project development handbook, chapter 3: project technology options,” 2017. Accessed: 08-Jan-2020. [Online]. Available: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-09/documents/pdh\\_chapter3.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-09/documents/pdh_chapter3.pdf).
- [26] H. C. Willumsen, “ENERGY RECOVERY FROM LANDFILL GAS IN DENMARK AND WORLDWIDE Hans C. WILLUMSEN,” pp. 1–9, 2008.
- [27] A. Petersson, “Biogas cleaning,” in *The Biogas Handbook*, Elsevier, 2013, pp. 329–341.

- [28] M. Beil and W. Beyrich, “Biogas upgrading to biomethane,” in *The Biogas Handbook*, Elsevier, 2013, pp. 342–377.
- [29] H. R. Amini, D. R. Reinhart, and A. Niskanen, “Comparison of first-order-decay modeled and actual field measured municipal solid waste landfill methane data,” *Waste Manag.*, vol. 33, no. 12, pp. 2720–2728, 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2013.07.025.
- [30] “Rellenosanitariolaglorita’s Blog | Just another WordPress.com weblog.” <https://rellenosanitariolaglorita.wordpress.com/> (accessed Aug. 30, 2020).
- [31] “Relleno sanitario La Glorita, referente en el país - El Diario.” <https://www.eldiario.com.co/seccion-d/disenoveapues-com/relleno-sanitario-la-glorita-referente-en-el-pais/> (accessed Aug. 30, 2020).
- [32] ATESA DE OCCIDENTE S.A.E.S.P, “Informe de caracterización de residuos a disponer en el relleno sanitario La Glorita de la ciudad de Pereira,” 2018.
- [33] “Solar Turbines | Energía para el futuro.” [https://www.solarturbines.com/es\\_MX/index.html](https://www.solarturbines.com/es_MX/index.html) (accessed Aug. 30, 2020).

## ANEXO 1. Modelo de biogás colombiano

El modelo de biogás colombiano parte de una ecuación de degradación de primer orden y es una herramienta para la estimación la generación y recuperación de biogás en rellenos sanitarios, específicamente, de Colombia. En este modelo se aplican ecuaciones separadas para calcular la generación de algunos grupos designados como:

- Residuos de degradación rápida.
- Residuos de degradación moderadamente rápida.
- Residuos de degradación moderadamente lenta
- Residuos de degradación muy lenta.

La cantidad total de la generación de biogás se calcula como la suma de la generación independiente de cada grupo. Cada una de estas categorías tiene asignado un valor de k y Lo que, a su vez, son usados en el cálculo. Al mismo tiempo, también se evalúan otros factores como el factor de corrección de metano (MCF) y otro que toma en cuenta el impacto por incendios.

### Valores de k [ $\frac{1}{\text{año}}$ ]

El índice k da noción de la generación de metano producida por la degradación de desechos orgánicos en el relleno sanitario. Está relacionado con la degradación de residuos que generan biogás y también con el periodo de vida de los residuos, obedeciendo a la ecuación: período =  $\ln(2)/k$ , si el valor de k aumenta, la degradación de residuos también lo hará, siempre y cuando el relleno continúe en operación. Los valores de k son función de:

- Contenido de humedad de los residuos
- Disponibilidad de nutrientes para las bacterias.
- pH.
- Temperatura.

Para las 4 categorías mencionadas existen valores de k estimados, esto debido a que existen algunas variables difíciles de medir como lo es la humedad. Los valores de k asignados a cada una de las cuatro categorías también varían en base a la precipitación promedio anual en el clima de la región donde está ubicado el relleno sanitario. El usuario del modelo



tendrá la opción de categorizar el clima en el sitio, en una de las 5 regiones climáticas basadas en la precipitación anual media:

- Seco (precipitación <500 mm/año)
- Moderadamente Seco (precipitación 500-999 mm/año)
- Moderadamente Húmedo (precipitación 1000-1499 mm/año)
- Húmedo (precipitación 1,500-1,999 mm/año)
- Excesivamente Húmedo (precipitación > 2,000 mm/año)

### **Caracterización de residuos y generación potencial de metano (Lo)**

El valor de la generación potencial de metano describe la cantidad total de gas metano producida por tonelada de residuos cuando estos se degradan y son función de los tipos de residuos que se encuentren allí, es decir, de la caracterización de los residuos. Los valores usados por este modelo se derivan de la caracterización realizada en 57 ciudades.

### **Factor de corrección de metano (MCF)**

Este es un factor de ajuste de estimación en la generación del biogás que toma en cuenta el grado de degradación anaeróbica de los residuos. Este factor está relacionado estrechamente con la geometría del relleno especialmente la profundidad, asimismo, las condiciones del relleno que favorezcan o no la degradación anaeróbica de los residuos.

### **Ajustes por impacto de incendio**

Incendios en rellenos sanitarios hace referencia a que los residuos son quemados dando como producción ceniza y no biogás, la generación de incendios impacta la producción de biogás.

### **Estimación de la Eficiencia de Captura y Recuperación de Biogás**

La eficiencia de captura es una medida de la habilidad del sistema de captura para recuperar el biogás generado. Está en función de cuánta área del relleno sanitario está cubierta por el sistema de captura y que tan eficientemente es operado y mantenido. La eficiencia de captura es un porcentaje aplicado por el Modelo a la generación de biogás para estimar la cantidad de biogás que puede ser recuperado para combustión o usado a beneficio del relleno. A pesar de que la recuperación de biogás puede ser medida, los índices de

generación de un relleno sanitario no pueden ser medidos (por esto se necesita el modelo para estimar la generación); por lo tanto, existe una incertidumbre considerable en la eficiencia de captura actual lograda en rellenos sanitarios.

### **Eficiencia de captura**

Para estimar la eficiencia de captura el modelo se basa en aspectos tales como:

- Operación del relleno: El tiempo de servicio brinda algunas características a las capas de cobertura y compactación de residuos.
- Cobertura del sistema de captura: Se diría que la eficiencia de captura está estrechamente relacionada con el sistema de captura.
- Profundidad de residuos: La profundidad afecta la disposición de los pozos y hay que tener en cuenta la filtración de aire en ellos.
- Cobertura: Las eficiencias de captura serán más altas para rellenos sanitarios con material de cobertura menos permeables sobre áreas con residuos, coberturas poco permeables limitan las emisiones de biogás a la atmósfera.
- Recubrimiento inferior: La eficiencia de captura será mayor evitando la migración de biogás hacia suelos aledaños.
- Compactación de residuos: Residuos sin compactar permiten la infiltración de aire, disminuyendo la calidad del biogás y haciendo su captura menor.
- Tamaño del área de disposición activa: Los sitios de vertido de residuos activos con manejo, tienen mayores eficiencias de captura que sitios de disposición con grandes áreas, pero sin manejo.
- Manejo de lixiviados: Un volumen alto de lixiviados puede afectar fuertemente las eficiencias de captura y esto dependerá del sistema de drenaje y la precipitación del sitio.

*Hoja de alimentación del modelo colombiano.*

PROYECCIONES DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS DE RELLENOS SANITARIOS		
PAGINA DE ALIMENTACIÓN		
1	Nombre del sitio:	La Gloria
2	Ciudad:	Pereira
3	Departamento:	Risaralda
4	Seleccionar una de 5 regiones geográficas en Colombia:	Andina <a href="#">Ver Mapa</a>
5	Seleccionar una de 5 zonas climáticas basado en la precipitación anual promedio:	Muy Húmedo (>2000 mm/yr)
6	¿Existen datos de caracterización de residuos específicos al relleno sanitario en cuestión?	Si
7	Año de apertura del sitio:	1997
8	Disposición anual del año mas reciente (Mg/año):	320.089 Mg
9	Año de disposición (ver #8):	2019
10	¿Existe información sobre el volumen total dispuesto en el sitio (volumen o masa)? Si no existe información, entonces pasar al #15	Si
11	¿Existe información sobre la disposición histórica de residuos para calcular el Mg. dispuesto en sitio?	Si
12	¿Cual es el estimado de residuos puesto en sitio al final del año? (ver #9)	329.692 Mg
13	¿Cual es la densidad estimada en sitio en Mg./m³? (rango típico: 0.5-1.0):	0,34 Mg/m³
14	Si el volumen de residuos puesto en sitio se encuentran en (m³), convertir a Mg.:	329.692 Mg
15	Año de clausura actual o proyectado:	2033
16	Crecimiento estimado en la disposición anual:	2,1%
17	Profundidad promedio del relleno sanitario:	10 m
18	Diseño y practicas de manejo del relleno sanitario (condiciones históricas promedio):	2
19a	¿Ha habido algún incendio en el relleno sanitario?	No
19b	Si la respuesta a 19a es "Si", indique el área del impacto en % del total del relleno sanitario:	
19c	Si la respuesta a 19a es "Si", indique la gravedad o impacto del incendio:	
20	Año de arranque del sistema de captura (actual/estimado):	2021
21	Porcentaje del área con residuos que cubre el sistema de captura:	63%
22	Porcentaje del área con residuos con cubierta final:	77%
23	Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia:	77%
24	Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria:	77%
25	Porcentaje del área con residuos sin cobertura:	-131%
26	Porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior de arcilla/geomembrana:	77%
27	¿La compactación de residuos se hace regularmente?	Si
28	¿La disposición de residuos se hace en una área especifica?	Si
29a	¿Existe el afloramiento/brote de lixiviado en la superficie del relleno sanitario?	No
29b	Si la respuesta de 29a es "Si", ¿esto ocurre solo después de llover?	Si
30	Eficiencia de captura estimada:	77%

DISPOSICIÓN Y RECUPERACIÓN DE Biogás						
Año	Disposición de Residuos Estimada (Toneladas Métricas)	Toneladas Métricas Acumuladas	Eficiencia del Sistema de Captura	Recuperación Actual de Biogás (m3/hr a 50% CH4)	Recuperación de Biogás Estimada (m3/hr a 50% CH4)	Línea Base de Recuperación de Biogás (m3/hr a 50% CH4)
1997	146.000	146.000	0%		0	0
1998	149.066	295.066	77%		294	0
1999	152.196	447.262	77%		519	0
2000	155.393	602.655	77%		694	0
2001	158.656	761.311	77%		833	0
2002	161.988	923.299	77%		947	0
2003	165.389	1.088.688	77%		1.042	0
2004	168.862	1.257.550	77%		1.124	0
2005	172.409	1.429.959	77%		1.197	0
2006	176.030	1.605.989	77%		1.262	0
2007	179.726	1.785.715	77%		1.323	0
2008	183.500	1.969.215	77%		1.380	0
2009	255.500	2.224.715	77%		1.435	0
2010	260.866	2.485.581	77%		1.625	0
2011	266.344	2.751.925	77%		1.781	0
2012	271.937	3.023.862	77%		1.913	0
2013	277.648	3.301.510	77%		2.028	0
2014	283.478	3.584.988	77%		2.131	0
2015	289.341	3.874.329	77%		2.225	0
2016	295.509	4.169.838	77%		2.313	0
2017	301.715	4.471.553	77%		2.397	0
2018	310.766	4.782.319	77%		2.478	0
2019	320.089	5.102.408	77%		2.562	0
2020	329.692	5.432.100	77%		2.649	0
2021	339.583	5.771.683	77%		2.740	0
2022	349.770	6.121.453	77%		2.832	0
2023	360.263	6.481.716	77%		2.928	0
2024	371.071	6.852.787	77%		3.026	0
2025	382.203	7.234.990	77%		3.127	0
2026	393.670	7.628.660	77%		3.230	0
2027	405.480	8.034.140	77%		3.336	0
2028	417.644	8.451.784	77%		3.445	0
2029	430.173	8.881.957	77%		3.556	0
2030	443.079	9.325.036	77%		3.671	0
2031	456.371	9.781.407	77%		3.789	0
2032	470.062	10.251.469	77%		3.909	0
2033	484.164	10.735.633	77%		4.034	0

*Alimentación de la hoja de disposición y recuperación de biogás.*

**INSTRUCCIONES:**

**Disposición de Residuos Estimada:** Introducir los índices de disposición anual en la Columna B solo en los años con información disponible. Los datos introducidos sustituirán los calculados en base a la hoja de cálculo de Alimentación.

**Eficiencia del Sistema de Captura:** La eficiencia de captura será calculada en base a las preguntas contestadas en la hoja de cálculo de Alimentación. El usuario podrá sustituir estos cálculos introduciendo la eficiencia de captura deseada en la columna D.

**Recuperación Actual de Biogás:** Si existe un sistema de captura instalado, introducir los flujos promedio anual a 50% metano. NO INTRODUZCA CEROS.

**Línea Base de Recuperación de Biogás:** Introduzca los flujos de biogás a 50% metano en la columna F. Ver la pagina Web CDM del UNFCCC para metodologías de determinación de línea base.

	Porcentajes de Eficiencia	
Corresponde a la practicas del manejo del sitio	100%	Descontar 15% si es el sitio no fue operado como relleno sanitario controlado.
Corresponde a la profundidad de residuos	100%	Descuento progresivo si la profundidad < 10 m (5% por cada metro)
Área de cobertura del sistema de captura	63%	Ajuste del factor de cobertura del sistema
Cobertura superior y su cobertura	78%	Cobertura final = 90%; Intermedia = 80%; Diaria = 75%; sin cobertura = 50%
Recubrimiento inferior y su cobertura	77%	Descontar 5% x el % de área sin recubrimiento inferior
Compactación de los residuos	77%	Descontar 3% si no hay compactación
Área de disposición designada	77%	Descontar 5% si no existe área de disposición designada
Lixiviado	77%	Descontar 40% dependiendo del clima y la frecuencia de los afloramientos
<b>Eficiencia de Captura Estimada:</b>	<b>77%</b>	

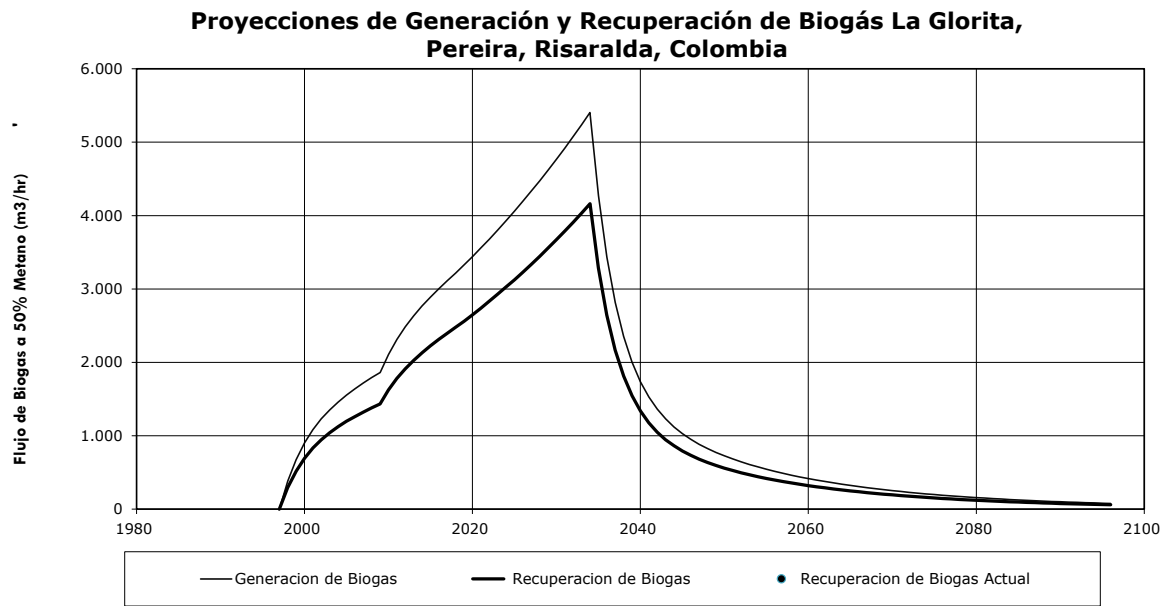
### *Hoja de instrucciones de disposición y recuperación de biogás.*

### *. Hoja de caracterización de residuos.*

TABLA DE CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS EN LOS DIFERENTES DEPARTAMENTOS DE COLOMBIA Y ESPECÍFICOS AL SITIO

Categoría de Residuo	Datos Específicos al Sitio	Risaralda	Amazonas	Antioquia	Arauca	Atlántico
Comida	44,0%	56,1%	69,8%	52,4%	52,0%	26,4%
Papel y Cartón	11,0%	7,5%	3,6%	8,6%	7,2%	10,9%
Poda (jardines)	0,0%	3,7%	7,8%	6,2%	5,5%	24,3%
Madera	0,0%	1,6%	0,6%	3,2%	1,4%	1,9%
Caucho, Piel, Huesos y Paja	0,0%	1,5%	1,1%	0,2%	1,2%	0,0%
Textiles	14,0%	4,2%	1,7%	2,6%	2,5%	3,9%
Papel Higiénico	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,5%	0,0%
Otros Orgánicos	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%	3,0%	0,6%
Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)	0,0%	1,5%	0,0%	0,0%	3,5%	5,5%
Metales	1,0%	0,8%	1,5%	1,3%	1,0%	1,4%
Construcción y Demolición	0,0%	0,5%	0,0%	0,0%	3,0%	10,0%
Vidrio y Cerámica	2,0%	1,5%	3,3%	3,1%	2,0%	3,0%
Plásticos	28,0%	19,0%	10,4%	14,8%	10,4%	8,7%
Otros Inorgánicos	0,0%	2,1%	0,4%	7,1%	5,0%	3,3%
TOTAL	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Porcentaje de degradación muy rápida (1)	44,0%	56,4%	69,8%	52,9%	55,7%	28,2%
Porcentaje de degradación moderadamente rápida (2)	0,0%	3,7%	7,8%	6,2%	7,9%	24,3%
Porcentaje de degradación moderadamente lenta (3)	25,0%	11,7%	5,3%	11,2%	9,7%	14,8%
Porcentaje de degradación muy lenta (4)	0,0%	3,1%	1,6%	3,4%	2,6%	1,9%
Total Orgánicos	69,0%	74,9%	84,5%	73,7%	75,9%	69,2%
Total Inorgánicos	31,0%	25,1%	15,5%	26,3%	24,1%	30,8%
Lo de degradación rápida calculado	70	70	70	70	70	71
Lo de degradación moderadamente rápida calculado	93	93	93	103	99	124
Lo de degradación moderadamente lenta calculado	159	159	161	169	167	167
Lo de degradación lenta calculado	200	200	200	200	200	200

PROYECCIONES DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS DE RELLENOS SANITARIOS													
La Gloria													
Pereira, Risaralda, Colombia													
Año	Disposición (Mg/ir)	Disposición Acumulada (Mg)	Generación de Biogás			Eficiencia del Sistema de Captura (%)	Recuperación de Biogás Estimada			Capacidad Máxima de la Planta de Electricidad* (MW)	Línea Base del Flujo de Biogás (m3/hr)	Reducción de Emisión Estimadas**	
			(m³/hr)	(cfm)	(mmBtu/hr)		(m³/hr)	(cfm)	(mmBtu/hr)			(tonnes CH <sub>4</sub> /yr)	(tonnes CO <sub>2</sub> eq/yr)
1997	146.000	146.000	0	0	0,0	0%	0	0	0,0	0,0	0	0	0
1998	149.066	295.066	382	225	6,8	77%	294	173	5,3	0,5	0	923	19.380
1999	152.196	447.262	674	397	12,0	77%	519	306	9,3	0,9	0	1.628	34.184
2000	155.393	602.655	901	531	16,1	77%	694	409	12,4	1,1	0	2.177	45.710
2001	158.656	761.311	1.082	637	19,3	77%	833	491	14,9	1,4	0	2.614	54.886
2002	161.988	923.299	1.230	724	22,0	77%	947	557	16,9	1,6	0	2.970	62.374
2003	165.389	1.088.688	1.354	797	24,2	77%	1.042	614	18,6	1,7	0	3.269	68.648
2004	168.862	1.257.550	1.460	859	26,1	77%	1.124	662	20,1	1,9	0	3.526	74.049
2005	172.409	1.429.959	1.554	915	27,8	77%	1.197	704	21,4	2,0	0	3.753	78.820
2006	176.030	1.605.989	1.639	965	29,3	77%	1.262	743	22,6	2,1	0	3.959	83.138
2007	179.726	1.785.715	1.718	1.011	30,7	77%	1.323	779	23,6	2,2	0	4.149	87.129
2008	183.500	1.969.215	1.792	1.055	32,0	77%	1.380	812	24,7	2,3	0	4.328	90.886
2009	255.500	2.224.715	1.863	1.097	33,3	77%	1.435	844	25,6	2,4	0	4.499	94.474
2010	260.866	2.485.581	2.110	1.242	37,7	77%	1.625	956	29,0	2,7	0	5.095	106.990
2011	266.344	2.751.925	2.313	1.361	41,3	77%	1.781	1.048	31,8	2,9	0	5.585	117.288
2012	271.937	3.023.862	2.485	1.462	44,4	77%	1.913	1.126	34,2	3,2	0	6.000	126.002
2013	277.648	3.301.510	2.634	1.550	47,1	77%	2.028	1.194	36,2	3,4	0	6.361	133.583
2014	283.478	3.584.988	2.768	1.629	49,5	77%	2.131	1.254	38,1	3,5	0	6.684	140.357
2015	289.341	3.874.329	2.890	1.701	51,6	77%	2.225	1.310	39,8	3,7	0	6.979	146.558
2016	295.509	4.169.838	3.004	1.768	53,7	77%	2.313	1.362	41,3	3,8	0	7.254	152.342
2017	301.715	4.471.553	3.113	1.832	55,6	77%	2.397	1.411	42,8	4,0	0	7.517	157.858
2018	310.766	4.782.319	3.218	1.894	57,5	77%	2.478	1.458	44,3	4,1	0	7.770	163.179
2019	320.089	5.102.408	3.327	1.958	59,5	77%	2.562	1.508	45,8	4,2	0	8.035	168.729
2020	329.692	5.432.100	3.441	2.025	61,5	77%	2.649	1.559	47,3	4,4	0	8.309	174.483
2021	339.583	5.771.683	3.558	2.094	63,6	77%	2.740	1.612	49,0	4,5	0	8.592	180.423
2022	349.770	6.121.453	3.679	2.165	65,7	77%	2.832	1.667	50,6	4,7	0	8.883	186.540
2023	360.263	6.481.716	3.803	2.238	67,9	77%	2.928	1.723	52,3	4,8	0	9.182	192.829
2024	371.071	6.852.787	3.930	2.313	70,2	77%	3.026	1.781	54,1	5,0	0	9.490	199.287
2025	382.203	7.234.990	4.061	2.390	72,6	77%	3.127	1.840	55,9	5,2	0	9.806	205.917
2026	393.670	7.628.660	4.195	2.469	75,0	77%	3.230	1.901	57,7	5,3	0	10.130	212.720
2027	405.480	8.034.140	4.332	2.550	77,4	77%	3.336	1.964	59,6	5,5	0	10.462	219.701
2028	417.644	8.451.784	4.474	2.633	79,9	77%	3.445	2.028	61,6	5,7	0	10.803	226.865
2029	430.173	8.881.957	4.619	2.718	82,5	77%	3.556	2.093	63,6	5,9	0	11.153	234.217
2030	443.079	9.325.036	4.768	2.806	85,2	77%	3.671	2.161	65,6	6,1	0	11.513	241.764
2031	456.371	9.781.407	4.920	2.896	87,9	77%	3.789	2.230	67,7	6,3	0	11.882	249.512
2032	470.062	10.251.469	5.077	2.988	90,7	77%	3.909	2.301	69,9	6,5	0	12.260	257.468
2033	484.164	10.735.633	5.238	3.083	93,6	77%	4.034	2.374	72,1	6,7	0	12.650	265.640
2034	0	10.735.633	5.404	3.181	96,6	77%	4.161	2.449	74,4	6,9	0	13.049	274.034
2035	0	10.735.633	4.269	2.512	76,3	77%	3.287	1.935	58,7	5,4	0	10.308	216.466
2036	0	10.735.633	3.435	2.022	61,4	77%	2.645	1.557	47,3	4,4	0	8.294	174.168
2037	0	10.735.633	2.817	1.658	50,3	77%	2.169	1.277	38,8	3,6	0	6.802	142.841
2038	0	10.735.633	2.355	1.386	42,1	77%	1.813	1.067	32,4	3,0	0	5.686	119.411
2039	0	10.735.633	2.005	1.180	35,8	77%	1.544	909	27,6	2,6	0	4.842	101.685
2040	0	10.735.633	1.737	1.022	31,0	77%	1.338	787	23,9	2,2	0	4.195	88.093
2041	0	10.735.633	1.529	900	27,3	77%	1.177	693	21,0	1,9	0	3.691	77.512
2042	0	10.735.633	1.363	802	24,4	77%	1.050	618	18,8	1,7	0	3.292	69.136
2043	0	10.735.633	1.230	724	22,0	77%	947	558	16,9	1,6	0	2.971	62.374
2044	0	10.735.633	1.121	660	20,0	77%	863	508	15,4	1,4	0	2.707	56.848
2045	0	10.735.633	1.030	606	18,4	77%	793	467	14,2	1,3	0	2.487	52.218
2046	0	10.735.633	952	560	17,0	77%	733	431	13,1	1,2	0	2.299	48.279
2047	0	10.735.633	885	521	15,8	77%	681	401	12,2	1,1	0	2.137	44.874
2048	0	10.735.633	826	486	14,8	77%	636	374	11,4	1,1	0	1.995	41.885
2049	0	10.735.633	774	455	13,8	77%	596	351	10,6	1,0	0	1.868	39.228
2050	0	10.735.633	726	428	13,0	77%	559	329	10,0	0,9	0	1.754	36.840
2051	0	10.735.633	684	402	12,2	77%	526	310	9,4	0,9	0	1.651	34.672
2052	0	10.735.633	645	379	11,5	77%	496	292	8,9	0,8	0	1.557	32.690
2053	0	10.735.633	609	358	10,9	77%	469	276	8,4	0,8	0	1.470	30.865
2054	0	10.735.633	575	339	10,3	77%	443	261	7,9	0,7	0	1.389	29.177
2055	0	10.735.633	544	320	9,7	77%	419	247	7,5	0,7	0	1.315	27.608
2056	0	10.735.633	516	303	9,2	77%	397	234	7,1	0,7	0	1.245	26.145
2057	0	10.735.633	489	288	8,7	77%	376	221	6,7	0,6	0	1.180	24.778
2058	0	10.735.633	463	273	8,3	77%	357	210	6,4	0,6	0	1.119	23.496
2059	0	10.735.633	440	259	7,9	77%	339	199	6,0	0,6	0	1.062	22.293
2060	0	10.735.633	417	246	7,5	77%	321	189	5,7	0,5	0	1.008	21.162
2061	0	10.735.633	396	233	7,1	77%	305	180	5,5	0,5	0	957	20.098
2062	0	10.735.633	377	222	6,7	77%	290	171	5,2	0,5	0	909	19.094
2063	0	10.735.633	358	211	6,4	77%	276	162	4,9	0,5	0	864	18.148
2064	0	10.735.633	340	200	6,1	77%	262	154	4,7	0,4	0	822	17.255
2065	0	10.735.633	324	190	5,8	77%	249	147	4,5	0,4	0	781	16.411
2066	0	10.735.633	308	181	5,5	77%	237	140	4,2	0,4	0	743	15.613
2067	0	10.735.633	293	172	5,2	77%	226	133	4,0	0,4	0	708	14.859
2068	0	10.735.633	279	164	5,0	77%	215	126	3,8	0,4	0	674	14.146
2069	0	10.735.633	266	156	4,7	77%	205	120	3,7	0,3	0	641	13.470
2070	0	10.735.633	253	149	4,5	77%	195	115	3,5	0,3	0	611	12.831
2071	0	10.735.633	241	142	4,3	77%	186	109	3,3	0,3	0	582	12.225
2072	0	10.735.633	230	135	4,1	77%	177	104	3,2	0,3	0	555	11.651
2073	0	10.735.633	219	129	3,9	77%	169	99	3,0	0,3	0	529	11.107
2074	0	10.735.633	209	123	3,7	77%	161	95	2,9	0,3	0	504	10.591
2075	0	10.735.633	199	117	3,6	77%	153	90	2,7	0,3	0	481	10.102
2076	0	10.735.633	190	11									



*Hoja de resultados-Gráfico*

## *ANEXO 2. Tutorial para el caso de estudio*

Cycle Tempo es un programa para modelado termodinámico y optimización de sistemas de conversión de energía, que permite definir las condiciones de los aparatos y composición de fluidos de trabajo utilizados por el sistema.

### *Condiciones del aire a la entrada del compresor*

Apparatus 3 Sink/Source

Apparatus statistics

No.: 3

Name: Sink/Source

Additional input data

Geometry input data

Off-design input data

Input data	
PIN	bar
POUT	1 bar
DELP	bar
TIN	°C
TOUT	25 °C
DELT	°C
DELE	kW
DELM	20 kg/s
HIN	kJ/kg
HOUT	kJ/kg
DELH	kJ/kg
XIN	-
XOUT	-
PIPE	-
ESTMAS	kg/s
LHV	kJ/kg
SUBTYP	-
DTSUBC	°C
DTSUPH	°C
WFOT	-
ESTTIN	°C
ESTTOU	°C
DELV	m3/s
DELVN	nm3/s

OK Cancel Clear Help

POUT y TOUT representan la presión y temperatura del aire a la entrada del compresor; DELM es el flujo másico usado para la simulación.

### *Característica del compresor*



Apparatus 1 Compressor

Apparatus statistics

No.: 1

Name: Compressor

Type: General

Additional input data

Geometry input data

Off-design input data

Input data

PIN		bar
POUT		bar
DELP		bar
TIN		°C
TOUT		°C
DELT		°C
PRATI	14	-
ETHAI	0.85	-
ETHAM		-
ETHAE		-

OK Cancel Clear Help

ETHAI representa la eficiencia isoentrópica del compresor; PRATI la relación de compresión del equipo.

### Condiciones del biogás de alimentación de la cámara de combustión

Apparatus 5 Sink/Source

Apparatus statistics

No.: 5

Name: Sink/Source

Additional input data

Geometry input data

Off-design input data

Input data

PIN		bar	XOUT		-
POUT	14	bar	PIPE		-
DELP		bar	ESTMAS		kg/s
TIN		°C	LHV		kJ/kg
TOUT	25	°C	SUBTYP		-
DELT		°C	DTSUBC		°C
DELE		kW	DTSUPH		°C
DELM		kg/s	WFOT		-
HIN		kJ/kg	ESTTIN		°C
HOUT		kJ/kg	ESTTOU		°C
DELH		kJ/kg	DELV		m3/s
XIN		-	DELVN		nm3/s

OK Cancel Clear Help

POUT y TOUT representan la presión y temperatura esperada del combustible a la entrada de la cámara de combustión.

### Condiciones de la cámara de combustión

Apparatus 4 Combustor

Apparatus statistics  
No.: 4  
Name: Combustor

Additional input data  
Separate components  
Bypass components

Input data  

EEQCOD		-
PIN		bar
POUT		bar
DELP	0	bar
TIN		°C
TOUT		°C
DELE		kW
LAMBDA	4.5	-
ESTQFR		kg/kg
TASH		°C
DTASH		°C
PASH		bar
DPASH		bar
ESTPOU		bar
TREACT	800	°C
DTREAC		°C
PREACT	14	bar
DPREAC		bar

OK Cancel Clear Help

LAMBDA representa el exceso de aire en el cámara de combustión; TREAC y PREAC son la temperatura y presión de llama adiabática, DELP se define como la diferencia de presión entre el combustible y el aire en la cámara de combustión.

### *Eficiencia de la turbina de gas de alta presión*

Apparatus 2 Turbine

Apparatus statistics  
No.: 2  
Name: Turbine

Additional input data  
Geometry input data  
Off-design input data

Input data  

TUCODE		-
GDCODE		-
PIN		bar
TIN		°C
TOUT		°C
DELT		°C
ETHAI	0.95	-
ETHAM		-
DIAM		m
DIAOUT		m
SENG		m
DESMAS		kg/s
PINCND		bar
POUTDS		bar
POUTRT		bar
ETHAID		-

OK Cancel Clear Help

ETHAI corresponde a eficiencia de la turbina de alta presión.

### *Características de la turbina de potencia*

Apparatus 7 Turbine

Apparatus statistics

No.: 7

Name: Turbine

Additional input data

Geometry input data

Off-design input data

Input data

TUCODE		-	PINCND		bar
GDCODE		-	POUTDS		bar
PIN	3.32	bar	POUTRT		bar
TIN		°C	ETHAID		-
TOUT		°C			
DELT		°C			
ETHAI	0.95	-			
ETHAM		-			
DIAIN		m			
DIADUT		m			
SENG		m			
DESMAS		kg/s			

OK Cancel Clear Help

PIN corresponde al valor de la presión a la entrada de la turbina de potencia; ETHAI representa la eficiencia del equipo.

### *Eficiencia del generador de potencia*

Generator no. 1

Apparatus statistics

No.: 1

Name: Generator

Additional input data

Geometry input data

Off-design input data

Input data

ETAGEN	0.99	-
COSPHI		-
GENMVA		MVA
KTURB		-
KGEN		-
CPRATI		-

OK Cancel Clear Help

ETAGEN se define como la eficiencia del generador de potencia del sistema.